



# Biopesticides contre maladies, insectes, mauvaises herbes

Christine Silvy, Guy Riba

## ► To cite this version:

Christine Silvy, Guy Riba. Biopesticides contre maladies, insectes, mauvaises herbes. Dossiers de l'Environnement de l'INRA, 2002, 19, pp.347-401. hal-01190032

**HAL Id: hal-01190032**

**<https://hal.science/hal-01190032>**

Submitted on 1 Sep 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Biopesticides contre maladies, insectes, mauvaises herbes

Christine SILVY \*, Guy RIBA \*\*

### introduction

La lutte biologique peut se définir comme une méthode de lutte contre un ravageur, une maladie ou une plante adventice, utilisant des agents naturels antagonistes de ceux-ci, c'est-à-dire des phytophages (s'il s'agit d'une plante adventice), des parasites, des prédateurs, des agents pathogènes (bactéries, virus, champignons...). Dans tous les cas, les agents naturels utilisés sont réunis sous le terme de biopesticide.

Certains, et notamment les Anglo-saxons, en donnent une définition plus large, en y incluant toutes les substances organiques qui ont un effet protecteur sur les plantes, qu'elles soient trouvées dans la nature ou synthétisées chimiquement (extraits végétaux, hormones, phéromones...).

Dans le présent chapitre, nous nous situerons à mi-chemin, traitant essentiellement des biopesticides au sens strict du terme, mais en mentionnant quand même les phéromones.

La diversité de plus en plus grande des cibles, des agents utilisés, des partenariats (industriels, collectivités territoriales, organismes internationaux...), l'intérêt croissant des pays en développement dans ce domaine, contrastent avec le faible nombre d'applications au stade industriel.

Après avoir fait un descriptif de chaque type d'agent utilisé en lutte biologique (mode d'action, contraintes, intérêt, applications, commercialisation, perspectives), nous dresserons un état général du marché mondial actuel des biopesticides, de ses potentialités et des conditions de son développement ; nous évoquerons enfin les réglementations en vigueur dans ce domaine.

\*Centre de Biologie et de Gestion des Populations (CBGP),  
Campus international Agropolis de Montpellier, Baillarguet  
CS 30016, 34988 Montpellier-sur-Lez  
Tél. : 04 99 62 33 16 — Fax : 04 99 62 33 45 — Mél. : [silvy@ensam.inra.fr](mailto:silvy@ensam.inra.fr) — <http://www.ensam.inra.fr/CBGP>

\*\*INRA, Direction scientifique « Plantes et produits du végétal »  
147, rue de l'Université, 75338 Paris Cedex 07  
Tél. : 01 42 75 92 39 — Fax : 01 42 75 94 29 — Mél. : [riba@paris.inra.fr](mailto:riba@paris.inra.fr) — <http://www.inra.fr>

Article paru dans Les Dossiers de l'Environnement de l'INRA, n° 19.



## arthropodes utiles

### UNE DIVERSITÉ À L'ORIGINE D'UN POTENTIEL IMPORTANT

#### ● CONTRE LES INSECTES

Parmi les nombreux arthropodes se développant dans les milieux cultivés, un certain nombre sont des ennemis naturels des ravageurs des cultures et en ce sens peuvent être considérés comme des auxiliaires de l'agriculteur. Au cours de leur développement larvaire ou au cours de leur vie imaginale, ils consomment un ou plusieurs prédateurs et contribueront ainsi à la régulation des populations d'insectes ou d'acariens nuisibles aux cultures. Leur rôle dans les milieux naturels est prépondérant.

#### Qu'est-ce qu'un PARASITOÏDE ? Qu'est-ce qu'un PRÉDATEUR ?

Un parasitoïde est un insecte dont les larves se développent aux dépens d'un autre insecte qui en mourra ; en règle générale, ce sont exclusivement les larves qui parasitent l'hôte.

Un prédateur est un organisme vivant qui tue d'autres êtres vivants pour s'en nourrir. Contrairement aux parasitoïdes, les prédateurs dévorent plusieurs proies au cours de leur vie.

#### *Parasitoïdes*

Il y a une infinité d'espèces parasitoïdes, notamment dans l'ordre des *Diptera* (*Tachinidae* en majorité) et des *Hymenoptera* (*Chalcidoidea* et *Ichneumonoidea* en majorité), parmi lesquels on trouve la quasi-totalité des insectes utilisés en lutte biologique. Selon Greathead (1995), plus de 6 000 programmes de lutte biologique classique contre les insectes et les acariens ont été entrepris depuis 1888, date de l'introduction en Californie de la coccinelle australienne *Rodolia cardinalis* pour lutter contre la cochenille *Icerya purchasi*.

À peine 10 % de ces programmes ont été couronnés de succès, quelques autres ont abouti à un contrôle partiel, la plupart sont des échecs.

#### *Prédateurs*

Ils se rencontrent dans des groupes variés : *Coleoptera* (*Carabidae*, *Cicindellidae*, *Coccinellidae*, *Staphylinidae*...), *Diptera* (*Anthomyiidae*, *Cecidomyiidae*, *Syrphidae*...), *Hemiptera* (*Anthocoridae*, *Miridae*, *Nabidae*, *Pentatomidae*, *Reduviidae*...), *Hymenoptera* (*Formicidae*, *Sphecidae*, *Vespidae*...), *Neuroptera* (*Chrysopidae*, *Coniopterygidae*, *Hemerobiidae*...), *Thysanoptera* (*Aeolothripidae*). Divers groupes d'arachnides ont aussi leur importance : les araignées en général et diverses familles d'acariens (*Phytoseiidae*...).

On peut globalement estimer que le nombre d'espèces prédatrices décrites doit dépasser les 200 000.

La lutte biologique par utilisation de prédateurs a connu de nombreux succès, en particulier avec les coccinelles, dont l'impact médiatique est toujours aussi vif auprès du grand public.



Les prédateurs sont beaucoup moins spécifiques que les parasitoïdes et peuvent tuer des proies aussi diverses que les acariens, des larves de thrips ou des pucerons. Ils peuvent consommer des proies à différents stades de développement (œuf, larve ou adulte).

### ● CONTRE LES MAUVAISES HERBES

Quatre-vingt cinq espèces appartenant à 28 taxa ont été introduites directement d'Europe dans d'autres continents pour la lutte biologique contre les mauvaises herbes d'origine européenne ; cela correspond à 181 lâchers directs ; 53 de ces espèces auxiliaires se sont établies, appartenant notamment à l'ordre des Diptères et dans une moindre mesure aux Coléoptères et aux Lépidoptères. Globalement on considère que 75 % des espèces lâchées se sont établies dans l'hémisphère nord pour seulement 55 % dans l'hémisphère sud ; ceci s'explique par l'incompatibilité avec le climat (dans 24 % des cas), le refus de la plante hôte, le lâcher d'un nombre inadéquat d'insectes, ou l'utilisation d'insectes en élevage prolongé au laboratoire avant le lâcher et la prédation.

12 % parmi lesquels on trouve surtout des Chrysomélides et des Curculionides sont considérés comme des agents de lutte efficaces.

La lutte biologique inoculative est particulièrement efficace contre les mauvaises herbes accidentellement introduites et pérennes des zones non cultivées ; en revanche, la lutte biologique inondative paraît mieux adaptée à la lutte contre les plantes annuelles et les adventices des cultures.

*Résumé des résultats de la lutte biologique classique par acclimatation d'insectes pour lutter contre les insectes ravageurs et les mauvaises herbes (d'après Hokkanen (1995), lui-même d'après la base BIOCAT de l'IIBC pour les insectes (1992) et d'après Julien (1992) pour les mauvaises herbes :*

	Lutte contre insectes ravageurs	Lutte contre mauvaises herbes
Nombre d'espèces introduites	4 769	692
Nombre d'établissements	1 445	443
Nombre d'espèces cibles	543	115
Contrôles effectifs	421	73
Pays ou îles	196	55

### EXEMPLES DE PRODUITS LEADERS SUR LE MARCHÉ

#### ● UN PORTEFEUILLE POUR LES SERRISTES FRANÇAIS

Depuis une quinzaine d'années, les producteurs ont recours à l'utilisation d'auxiliaires, notamment contre les aleurodes, pucerons, mouches mineuses, thrips et acariens. Les auxiliaires commercialisés pour la lutte biologique sous serre sont nombreux et leur gamme s'est largement étendue depuis plusieurs années mais seulement certains sont reconnus efficaces en pratique.



Les insectes utilisés en cultures légumières et en cultures ornementales sont pratiquement identiques, les principaux étant *Encarsia*, *Phytoseiulus*, *Macrolophus*, *Orius*, *Amblyseius* et *Anagrus* (voir tableau 1, p. 337 à 340).

*Encarsia formosa* reste et demeure le principal auxiliaire utilisé avec plus de 700 ha (500 ha en 1996) mais une bonne progression de *M. caliginosus* est enregistrée avec 335 ha (221 en 1996). Actuellement l'utilisation de la lutte biologique sous serre en France est en augmentation (Maisonneuve, 1998) : en 1997, 820 ha ont été traités (contre 581 en 1996) dans cinq principales régions : Bretagne (plus de 200 ha), région PACA (160 ha), Aquitaine/Limousin/Poitou-Charentes (145 ha), Pays de Loire (125 ha), Rhône-Alpes (80).

Les cultures concernées se diversifient : tomates (en augmentation, 645 ha), fraisiers (51 ha), concombre (47 ha), poivrons (en nette augmentation, 28 ha), aubergines (en nette augmentation, 25 ha), framboisier (10 ha), plantes condimentaires (7 ha), melon (6 ha).

Ce succès s'explique par un environnement favorable (« climat » des serres, conduite optimale des cultures), une organisation rigoureuse du travail sur le terrain, une forte motivation des serristes qui voient en cette démarche un argument de valorisation de leurs productions (emploi raisonné des intrants phytosanitaires, utilisation soignée des auxiliaires de qualité). La mise en œuvre de la lutte biologique sous serre ou abri exige un suivi technique rigoureux impliquant d'abord des mesures prophylactiques afin d'introduire les auxiliaires dans un environnement favorable où ils pourront exprimer leur potentiel de façon optimale.

Les chiffres concernant les cultures ornementales sont également en augmentation : en 1997, les auxiliaires ont été utilisés sur 10 ha de plantes en pot, 6 ha de fleurs coupées et 2 ha de cultures diverses dont deux parcs botaniques, soit un total de 18 ha (contre 6,57 en 1996). Les principales régions utilisatrices sont la Bretagne (6,5 ha), PACA (3,8 ha), Alsace/Lorraine/Champagne/Bourgogne (2,3 ha), Centre (2,15 ha), Basse et Haute Normandie (1,6 ha) et Aquitaine (1,2 ha).

Cette tendance à l'augmentation observée en 1997 préfigure, selon J.-C. Maisonneuve (1998,) la poursuite d'un développement dans les années à venir.

### ● LES TRICHOGRAMMES

Les trichogrammes sont des insectes parasitoïdes oophages, micro-Hyménoptères Chalcidiens de la famille des *Trichogrammatidae*. On en connaît actuellement 132 espèces, toutes du genre *Trichogramma*. Leur taille est souvent inférieure à 1 mm. La larve des parasites oophages se développe à l'intérieur de l'œuf de l'insecte-hôte dont l'embryon est tué à un moment plus ou moins précoce de la vie larvaire du parasitoïde. Avec les trichogrammes, l'hôte est tué très tôt et ce sont ses tissus désintégrés et son vitellus qui servent de nourriture à la larve du trichogramme et assure son développement jusqu'à sa métamorphose, transformation en nymphe puis en imago. Cet adulte mène ensuite une vie libre,

Suite p. 355



Tableau 1 – Entomophages et acarophages commercialisés  
1.1. Insectes entomophages (parasites et prédateurs) commercialisés

Insecte	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Anagrus atomus</i>	Anagrus atomus native species	English Woodland Biocontrol	Cicadelles
	Anagrus	Biological Crop Protection	
	Anagrus-system	Biobest	
	Ana-line-a	Syngenta Bioline	
<i>Aphelinus abdominalis</i>	Aphelinus	Sauter & Stepper	<i>Macrosiphum euphorbiae</i>
	Aphelin	Koppert	
	Aphelin-line ab	Syngenta Bioline	
	Aphelinus-system	Biobest	
	Aphelinus	IPM Laboratories	
	Aphelinus	Praxis	
	Aphelsure	Biological Crop Protection	
	Aphelinus abdominalis	GIE La Croix	
<i>Aphidius colemani</i>	Aphi-line c, e	Syngenta Bioline	Pucerons
	Ervi-System, Aphidius-system	Biobest	
	Aphidius ervi	Rincon-Vitova	
	Aphidius ervi	IPM Labs	
	Aphidius ervi	Praxis	
	Aphipar	Koppert	
	Ervipar	Koppert	
	Aphisure	Biological Crop Protection	
<i>Aphidius ervi</i>	Ervi-system	Biobest	Pucerons
<i>Aphidius matricariae</i>	Aphidius matricariae	Applied Bio-Nomics	Pucerons
<i>Aphidoletes aphidimyza</i>	Aphido-line a 250	Syngenta Bioline	Pucerons
	Aphidoletes-V	Applied Bio-Nomics	
	Aphidoletes Aphid Parasites	English Woodland Biocontrol	
	Aphidoletes Gallmücken	Neudorff, Sauter & Stepper	
	A. aphidomyza Midge AA250	Rincon-Vitova Insectaries	
	A. aphidomyza AA1	Rincon-Vitova Insectaries	
	A. aphidomyza	IPM Laboratories	
	A. aphidomyza Predatory Gall Midge	M & R Durango	
	Aphidoletes-System	Biobest	
	Aphid Predator	Arbico	
	A. aphidomyza (adults)	Applied Bio-Nomics	
	Aphidosure	Biological Crop Protection	
	Aphidend	Koppert	
	A. aphidomyza	Praxis	
<i>Aphytis lignanensis</i>	Aphytis lignanensis	Bugs for Bugs	Cochenilles
<i>Aphytis melinus</i>	Aphytis melinus	Biological Services	
	«	Arbico	
	«	IPM Labs	
	«	Praxis	
<i>Chrysoperla carnea</i>	Green Lacewing	Arbico	Pucerons
	Chrysore	Biological Crop Protection	
	Chrysopa MC-500-System	Biobest	
	Lacewing	Kunafin	
	Chrysoperla carnea, Crypto-line m	Syngenta Bioline	
	Chrysoperla	Sauter & Stepper	
	Lacewing	Rincon-Vitova Insectaries	
	Chrysoperla carnea	Neudorff, IPM Laboratories, Praxis	
	Cryptobug, Chrysopa	Koppert	
	Chrysopa-line c	Syngenta Bioline	
<i>Cotesia</i>	Cotesia plutella	Arbico, Biofac, Caltec, Praxis	Larves Lépidoptères
	Cotesia marginiventris	Arbico, Biofac, Caltec, Praxis	
<i>Cryptolaemus montrouzieri</i>	Cryptobug	Koppert	<i>Pseudococcidae</i>
	Crypto-line m	Syngenta Bioline	

Tableau 1 (suite) – Entomophages et acarophages commercialisés

1.1. Insectes entomophages (parasites et prédateurs) commercialisés

Insecte	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Dacnusa sibirica</i>	Minusa	Koppert	Mouches mineuses
	Dac-line s	Syngenta Bioline	
	Dacnusa-System	Biobest	
	Dacsure	Biological Crop Protection	
	Dacnusa sibirica	Praxis	
	Dacnusa	Sauter & Stepper	
<i>Dacnusa sibirica</i> & <i>Diglyphus isaea</i>	Minex	Koppert	
	Dac-line s et Dig-line i	Syngenta Bioline	
	Dacnusa/Diglyphus	Neudorff	
	Diglyphus/Dacnusa	Sauter & Stepper	
	Dacnusa-system	Biobest	
<i>Delphastus pusillus</i>	Delphastus-A	Applied Bio-Nomics	Aleurodes
	Delphastus pusillus	IPM Laboratories	
	Whitefly Destroyer	Nature's Alternative Insectary	
	Delphastus-system	Biobest	
	Delsure	Biological Crop Protection	
	Delphastus pusillus Beetles	Rincon Vitova Insectaries	
	Delphastus pusillus Predator Beetle	M & R Durango	
<i>Diglyphus isaea</i>	Delphastus pusillus	Arbico, Praxis, Koppert	Mouches mineuses
	Miglyphus	Koppert	
	Dig-line i	Syngenta Bioline	
	Digsure	Biological Crop Protection	
	Diglyphus isaea	Neudorff, Praxis, GIE La Croix	
	Diglyphus-system	Biobest	
<i>Encarsia formosa</i>	Encar-line f 10 000, Encar-line f 6000	Syngenta Bioline	Aleurodes
	En-Strip	Koppert	
	Para-strip, Para-bulk	Applied Bio-Nomics	
	Encarsia formosa glasshouse whitefly parasite	M & R Durango	
	Sweet Potato Whitefly Predator	Arbico	
	Encarsia formosa Whitefly Parasite	Biofac	
	Encarsia Whitefly Parasites	English Woodland Biocontrol	
	Encarsia formosa wasps	Rinco Vitova Insectaries	
	Encarsia-system	Biobest	
	Encarsia Cards	Biobest	
	Encsure	Biological Crop Protection	
	Encarsia formosa	Praxis	
<i>Eretmocerus sp. nr</i> <i>Californicus (eremicus)</i>	Encarsia	GIE La Croix	Aleurodes
	Ercal	Koppert	
	Eret-line cal	Syngenta Bioline	
	Eretmocerus californicus-Small Parasitic Wasp	M & R Durango	
	Eretmocerus californicus	Praxis, IPM Laboratories, Beneficial Insectary	
	Eretsure	Biological Crop Protection	
<i>Harmonia axyridis</i>	Eretmocerus-system	Biobest	Pucerons
	Harmonia	Biotop	
	Harmonia-system	Biobest	
<i>Hippodamia convergens</i>	Harmonia axyridis	Koppert	Pucerons, aleurodes
	Ladybugs	Kunafin	
	Hippodamia convergens Lady Beetle	M & R Durango	
	Hippodamia System	Biobest	
	Hippodamia convergens (Ladybugs)		
	Aphid Destroyer	Nature's Alternative Insectary	
	Ladybird Beetle	Arbico	
	Ladybug	BioPac	
<i>Leptomastix dactylopii</i>	Aphidamia	Koppert	Planococcus citri
	Leptopar	Koppert	
	Mealybug Parasite	Arbico	
	Leptomastix	Sauter & Stepper	
	Lepsure	Biological Crop Protection	
	Leptomastix-system	Biobest	
	Leptomastix dactylopii	IPM Laboratories, Bugs for Bugs, Neudorff	
	Lepto-line d	Syngenta Bioline	



Tableau 1 (suite) – Entomophages et acarophages commercialisés

## 1.1. Insectes entomophages (parasites et prédateurs) commercialisés

Insecte	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Macrolophus caliginosus</i>	Macrolophus-system Macro-line C+ Mirical	Biobest Syngenta Bioline Koppert	Aleurodes
<i>Metaphycus bartletti</i>	Metaphycus bartletti	Biotop, Koppert	<i>Saissetia oleae</i> (cochenilles)
<i>Metaphycus helvolus</i>	Metsure Metaphycus helvolus wasps Metaphycus helvolus	Biological Crop Protection Rincon-Vitova IPM Laboratories	Cochenilles
<i>Orius albidipennis</i>	Minute Pirate Bug Orius Orius System Ori-line a Orius-Raubwanzen	Arbico Sauter & Stepper Biobest Syngenta Bioline Neudorff	Thrips
<i>Orius insidiosus</i>	Ori-line i Predatory Minute Pirate Bug Orius insidiosus Private Bug Orius insidiosus Minute Pirate Bug Orius Orius System Orius-Raubwanzen	Syngenta Bioline M & R Durango Nature's Alternative Insectary IPM Laboratories Arbico Sauter & Stepper Biobest Neudorff	Thrips
<i>Orius laevigatus</i>	Thripor Ori-line 1 Orisure Minute Pirate Bug Orius Orius System Orius-Raubwanzen	Koppert Syngenta Bioline Biological Crop Protection Arbico Sauter & Stepper Biobest Neudorff	Thrips
<i>Orius majusculus</i>	Ori-line m Minute Pirate Bug Orius Orius-System Orius-Raubwanzen	Syngenta Bioline Arbico Sauter & Stepper Biobest Neudorff	Thrips
<i>Podisus maculiventris</i>	Podibug	Koppert	Lépidoptères, Coléoptères
<i>Trichogramma brassicae</i>	Trig  Trichocap, Pyratyp TR16	UNCAA et Biotop  BASF UNCAA	Ceufs Lépidoptères ( <i>Ostrinia nubilalis</i> , <i>Mamestra brassicae</i> , <i>Helicoverpa armigera</i> )
<i>Trichogramma evanescens</i>	Tricho-strip  Tricho-line	Koppert  Syngenta Bioline	Ceufs Lépidoptères ( <i>Helicoverpa zea</i> , <i>Heliothis virescens</i> , <i>Ostrinia nubilalis</i> )
<i>Trichogramma evanescens</i> + <i>Trichogramma brassicae</i>	Trichogramme-serre Trichogramma-mix-system	Biotop Biobest	
<i>Trichogramma maidis</i>	Pyratyp TR16	BASF UNCAA	<i>Ostrinia nubilalis</i>



Tableau 1 (suite) – Entomophages et acarophages commercialisés

1.2. Acariens entomophages et acarophages commercialisés

Acarien	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Amblyseius barkeri</i>	Thripex C, Spical Broad Mite Biocontrol Thrips Predator	Koppert IPM Laboratories Arbico	Thrips
<i>Amblyseius californicus</i>	Ambly-line cal 2000 Californicus-system Spider Mite Predator Amsure Spical	Syngenta Bioline Biobest Arbico Biological Crop Protection Koppert	Acariens phytophages
<i>Amblyseius cucumeris</i>	Ambly-line cu 25000 Thripex-C Thripex Plus Amblyseius-C Thrips Destroyer Amsure Amblyseius Thrips Predators Thrips Biocontrol Thrips Predator Amblyseius-system, Amblyseius-vermiculite-system Amblyseius Breeding System	Syngenta Bioline Koppert Koppert Applied Bio-Nomics Nature's Alternative Insectary Biological Crop Protection English Woodlands Biocontrol IPM Laboratories Arbico  Biobest Biobest	Thrips
<i>Amblyseius barkeri</i> + <i>Amblyseius cucumeris</i>		Neudorff	
<i>Amblyseius degenerans</i>	Ambly-line d Degenerans L Iphiseius degenerans Degenerans-system Thripans	Syngenta Bioline Applied Bio-Nomics Rincon-Vitova Insectaries Biobest Koppert	Thrips
<i>Amblyseius fallacis</i>	Amblyseius fallacis « «	IPM Laboratories Rincon-Vitova Praxis	Acariens
<i>Feltiella acarisuga</i>	Therodiplosis-system Felsure Felti-line a	Biobest Biological Crop Protection Syngenta Bioline	Acariens
<i>Galendromus occidentalis</i>	Galendromus occidentalis « « «	Arbico IPM Laboratories Praxis Rincon-Vitova	Acariens
<i>Hypoaspis miles</i>	Entomite Hypo-line m Hypoaspis Sciarid Fly Predators Hyposure(m) Hypoaspis miles Hypoaspis miles Hypoaspis-system Hypex	Koppert Syngenta Bioline English Woodland Biocontrol Biological Crop Protection Applied Bio-nomics Neudorff Biobest Svenska Predator	Acariens + Thrips + Sciarides
<i>Phytoseiulus persimilis</i>	Phyto-line p Spidex Spidex Plus Phytoseiulus-system Phytosure Phytoseiulus persimilis	Syngenta Bioline Koppert Koppert Biobest Biological Crop Protection Neudorff	Acariens
<i>Typhlodromus occidentalis</i>	Typhlodromus occidentalis	Biological Services	Acariens
<i>Typhlodromus pyri</i>	Typhlodromus-system Typex	Biobest Svenska Predator	



consacrée à l'accouplement et à la recherche par la femelle d'œufs hôtes pour y déposer sa ponte.

L'utilisation pratique des trichogrammes repose sur une chaîne de procédures : production de l'hôte de substitution, production de trichogrammes, lâchers de trichogrammes et contrôles *ad-hoc*.

Cette technique de lutte biologique par traitements inondatifs exige une grande quantité de trichogrammes. Une production à l'échelle industrielle est indispensable. L'élevage en masse des trichogrammes se pratique non pas sur le ravageur cible mais sur un hôte de substitution, beaucoup plus facile à élever en toute saison et capable d'assurer le développement correct de l'auxiliaire. Les deux espèces les plus fréquemment employées sont la Pyrale de la farine, *Ephestia kuehniella*, et l'Alucite des céréales, *Sitotroga cerealella* (Lépidoptères). Pour faciliter les élevages de masse, des études sont développées depuis plusieurs années aux États-Unis, en Chine et en France pour élaborer des œufs et des milieux artificiels permettant aux femelles d'y pondre et aux larves de s'y développer.

En France, l'INRA d'Antibes et son partenaire industriel l'Union InVivo (ex-UNCAA) ont mis au point une technique innovante protégée par plusieurs brevets. Ce procédé est constitué principalement par la production de trichogrammes sur les œufs d'*Ephestia kuehniella*. Les œufs de cette pyrale, infestés par les trichogrammes, sont stockés dans des capsules opaques à 3°C, après avoir induit une diapause des trichogrammes durant tout l'hiver. Les capsules, ensachées pour des traitements d'1 ha, sont alors immédiatement disponibles pour les traitements du printemps qui concernent aujourd'hui essentiellement la lutte contre la Pyrale du maïs. Ces travaux s'intègrent dans les activités de l'OILB (Organisation Internationale de Lutte Biologique) à travers un de ses groupes de travail « Trichogramma and other egg parasitoids ».

Les trichogrammes sont les parasitoïdes les plus étudiés et les plus utilisés dans le monde pour les lâchers inondatifs. Chaque année environ  $32 \times 10^6$  ha de cultures ou de forêts sont traités dans le monde avec des préparations commerciales de *Trichogramma* spp.

Durant les 30 dernières années, *Trichogramma* spp. a été utilisé sur maïs, canne à sucre, coton, cultures légumières et fruitières dans plus de trente pays (Europe, Amérique du Nord, ex-URSS, Chine). La plupart des essais ont utilisé cinq espèces seulement de trichogrammes contre deux ravageurs, la Pyrale du maïs, *Ostrinia nubilalis*, et *Helicoverpa zea*. Selon Van Lenteren (1997), le prix moyen du traitement d'1 ha avec *Trichogramma brassicae* est de 102,79 \$, et avec *Trichogramma evanescens*, 60,35 \$.

En France, les trichogrammes ont été utilisés en 1997 en culture céréalière sur environ 30 000 ha de maïs pour lutter contre la Pyrale du maïs. En 1996, 88 % des agriculteurs qui avaient ainsi traité avaient l'intention de recommencer, et de nouveaux utilisateurs se laisseront sûrement séduire par la nouvelle présen-



tation simplifiée de PYRATYP, produit par la firme Biotop et distribué par l'Union InVivo (ex-UNCAA) et BASF. La dose d'emploi est de 250 000 trichogrammes par ha. Par ailleurs, en 1997, les trichogrammes ont été utilisés sur 88 ha de cultures légumières en France (47 ha de maïs doux contre la Pyrale du maïs, 25 ha de poivron, 14 ha de melon et 2 ha d'artichaut).

Tout aussi efficaces que les insecticides chimiques concurrents, les trichogrammes ont un développement économique limité par les contraintes de coûts de production. Les techniques utilisées pour l'emballage, la conservation, le transport et le lâcher des trichogrammes peuvent aussi avoir une influence sur l'efficacité au champ.

Des améliorations sont attendues par l'identification des caractéristiques génétiques des populations de *Trichogramma* sp. ainsi que l'adaptation des techniques d'élevage de masse pour améliorer la vitalité et la productivité. Moins complexe et moins chère, la production d'un organisme standardisé et de qualité est l'objectif essentiel des prochaines années.

## PERSPECTIVES

### ● UNE MEILLEURE EXPLOITATION DES RESSOURCES GÉNÉTIQUES

Bien que les introductions en lutte biologique aient connu beaucoup de succès, plus de 80 % des introductions contre les insectes ravageurs ont échoué. Plusieurs hypothèses ont été émises mais très peu d'entre elles ont été éprouvées expérimentalement.

À cette fin, Hopper *et al.* (1996) ont accompagné d'observations les récentes introductions contre *Diuraphis noxia* et autres ravageurs en Amérique du Nord : impact des ennemis naturels dans l'aire d'origine du ravageur, variabilité génétique des auxiliaires dans et parmi les régions géographiques, variabilité de la sensibilité de l'hôte à telle ou telle souche d'auxiliaire, caractéristiques biotiques des auxiliaires efficaces, impact de l'élevage au laboratoire sur le comportement de recherche de l'hôte par l'auxiliaire, barrières démographiques aux introductions et finalement adaptation génétique après l'introduction.

### ● UNE AMÉLIORATION GÉNÉTIQUE FACILITÉE

La sélection pour une qualité accrue des parasitoïdes (fécondité et tolérance aux facteurs environnementaux extrêmes et aux résidus de pesticides) est importante pour le succès des lâchers mais peu de recherches ont été faites dans ce domaine. Un travail est nécessaire pour identifier quels traits ont une variabilité génétique suffisante pour être sélectionnés, à quelle rapidité cette sélection peut réussir et combien de temps elle peut durer.

Par exemple, chez *Trichogramma brassicae*, la démonstration de l'existence de variabilité génétique dans les traits biologiques quantitatifs impliqués dans la



stratégie de reproduction est à la base d'une sélection pour améliorer l'efficacité des trichogrammes. Les cartes génétiques sont un outil puissant pour accélérer la sélection ; elles donnent des marqueurs couvrant tout le génome pour l'identification des QTL (Quantitative Traits Loci).

#### ● DES TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DE MASSE PLUS PERFORMANTES

Le procédé d'élevage de masse des trichogrammes a été mis en œuvre de différentes façons au cours des 70 dernières années et a fait l'objet de nombreuses études. C'est un domaine en évolution et de nombreux moyens ont été développés ces cinq dernières années.

Il existe deux types de systèmes d'élevage : des systèmes à production journalière élevée pour du court terme (lâchers ponctuels) et des systèmes à production journalière faible pour du long terme. Cela aboutit à une production de 4 à 1 000 millions de parasitoïdes par jour selon le mode de production. Dans le cadre des plus grandes installations, on peut atteindre une production de 100 millions de femelles de parasitoïdes par semaine.

Les firmes commerciales les plus importantes se trouvent en Europe (France, Pays-Bas, Suisse, Allemagne), États-Unis, Canada et Mexique, ainsi qu'en Chine, en ex-URSS et au Brésil. D'autres, plus petites, se trouvent en Amérique Centrale et du Sud, Australie, Europe du Sud et de l'Est, Afrique du Sud, Inde et Asie du Sud, sous différents statuts (privé, public, coopératives...) (voir tableau 1, p. 349).

Il reste nécessaire, pour aller encore plus loin dans les progrès de cette commercialisation à grande échelle, d'étudier différents hôtes d'élevage et milieux artificiels dans des systèmes automatisés. Un des domaines les plus importants sera le développement d'un support pour fournir le produit à l'utilisateur et permettant au produit d'être efficace au champ.

#### ● DES CRITÈRES DE QUALITÉ ET DES PROCÉDURES DE CONTRÔLE

Les PARAMÈTRES DE QUALITÉ (pour tous les entomophages) sont la qualité intrinsèque de l'auxiliaire (fécondité, longévité...) et la qualité liée au type de conditionnement et de stockage. De plus, cette qualité doit être assurée, d'une part à la sortie de l'unité de production avant la commercialisation de l'auxiliaire et, d'autre part, à la réception chez le producteur. Ensuite, cette qualité devra bien sûr être contrôlée sur le terrain par l'efficacité réelle sur les ravageurs présents. Des standards de qualité à la sortie de l'unité de production ont été proposés pour 17 auxiliaires dont 10 concernent les cultures protégées. Ils ont été définis suite à une réflexion méthodologique menée depuis 1991 par des chercheurs et des producteurs dans le cadre d'un groupe de travail de l'OILB et d'une action concertée de l'Union Européenne. Complémentairement à ce groupe de travail, le Comité de Lutte biologique, qui réunit l'INRA, le CTIFL



et le SPV, a comme objectif la qualité des auxiliaires présents sur le marché français et en particulier d'établir des fiches qualité au moment de l'arrivée chez les serristes. Enfin, les effets sur les organismes non cibles vont devenir de plus en plus importants car il est actuellement demandé aux producteurs de s'en assurer avant que les trichogrammes ne puissent être homologués.

#### ● TECHNIQUES DE LÂCHERS

Les lâchers inoculatifs (lâchers d'un nombre relativement faible de ces auxiliaires en pariant sur leur capacité à s'installer, au cours des générations, en conduisant à une réduction stable de l'effectif du ravageur) ont fait l'objet de beaucoup moins de recherche expérimentale que les lâchers inondatifs (lâchers périodiques d'une importante quantité d'insectes afin de détruire le plus possible de ravageurs avant qu'ils ne commettent de dégâts), à cause de la complexité écologique. Cela est regrettable car des études ont prouvé l'efficacité d'une utilisation de trichogrammes avec d'autres microorganismes ou d'une combinaison avec d'autres parasitoïdes. Les quantités actuelles utilisées dans les lâchers varient considérablement : par exemple, pour le lâcher de *Trichogramma maidis* seul contre *Ostrinia* en Europe, le nombre varie de 150 000 à 2,8 millions par hectare. Les chiffres de plusieurs millions sont généralement cités pour les forêts ou les vergers ; par contre, dans des cultures comme le blé, le cotonnier ou la tomate, cela va de 500 à plus d'1 million par hectare, avec des moyennes de 200 à 600 000.

#### EXEMPLE D'ACCLIMATATION RÉUSSIE EN GUADELOUPE

Originaire d'Asie, la Cochenille de l'hibiscus, *Maconellicoccus hirsutus*, a été introduite dans la région néotropicale à Grenade en 1994. Depuis, elle a envahi Trinidad, Tobago et le Guyana en Amérique du Sud. Elle est également présente dans la plupart des îles des Petites Antilles et menace désormais les Grandes Antilles et, aux États-Unis, la Floride et maintenant la Californie.

La lutte chimique s'est montrée inopérante pour assurer de façon durable et globale la maîtrise de cette cochenille ; compte tenu de sa biologie, seule une lutte biologique par introduction d'auxiliaires appropriés peut permettre son contrôle durable en Guadeloupe.

Dans le cadre d'un programme engagé par les CAB (Commonwealth Agricultural Bureaux), l'INRA a procédé aux introductions et aux premiers lâchers d'une coccinelle prédatrice, *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant, et d'un Encyrtidé parasite, *Anagyrus kamali* Moursi.

Un an après les premiers lâchers, 14 000 coccinelles et 12 000 parasites ont été introduits en Guadeloupe dans toutes les communes infestées et ces auxiliaires sont maintenant bien implantés dans l'île.



## des bactéries pour protéger les plantes

### BACILLUS THURINGIENSIS

La bactérie entomopathogène *Bacillus thuringiensis* a été le premier microorganisme homologué dans le monde comme biopesticide (mais le premier à avoir été commercialisé est la Lemoultine à base du champignon *Isaria densa*, contre les vers blancs, au début du 20<sup>e</sup> siècle). Les premières homologations datent des années 60 aux États-Unis et des années 70 en France. Les préparations à base de *Bacillus thuringiensis* concernent près de 90 % du marché des biopesticides, car cette bactérie se multiplie facilement en fermenteurs et est à l'origine de produits formulés stables, très sélectifs et dont les prix sont compétitifs.

Découvert pour la première fois au Japon en 1902 dans un élevage de vers à soie (*Bombyx mori*), *Bacillus thuringiensis* a été de nouveau isolé en 1911 en Thuringe (Allemagne) à partir d'une population de Teigne de la farine (*Ephestia kuehniella*) par Berliner qui comprit l'utilisation possible de ce germe pour lutter contre des insectes nuisibles.

*Bacillus thuringiensis* est une bactérie Gram-positive qui a la particularité de synthétiser un cristal protéique lors de la sporulation.

L'activité entomopathogène de ce germe est liée à la présence de cette inclusion parasporale (cristal), constituée de protoxines, appelées également delta-endotoxines. Les cristaux ont, le plus souvent et selon les souches, une activité larvicide sur différentes espèces d'insectes appartenant à trois ordres : Lépidoptères, Coléoptères et Diptères. Toutefois, les efforts exceptionnels pour la découverte de nouveaux isolats de *Bacillus thuringiensis* ont abouti à l'isolement de souches actives contre des acariens, des nématodes et de nombreux autres ordres d'insectes.

Les cristaux synthétisés par la bactérie sont constitués de protoxines, qui, une fois ingérées par l'insecte, sont digérés en milieu alcalin par les protéases digestives et transformées en toxines polypeptidiques actives. Les delta-endotoxines activées par les protéases de l'insecte se fixent sur des récepteurs spécifiques situés sur les cellules de l'épithélium intestinal. L'intoxication se manifeste très rapidement par d'importantes lésions au niveau de l'intestin et par une paralysie du tube digestif, entraînant un arrêt immédiat de l'activité d'alimentation. La mort de l'insecte intervient en 24 à 48 heures après l'ingestion des cristaux et peut être ou non accompagnée d'une septicémie. Les aspects moléculaires du mécanisme qui aboutissent à la mort des insectes ne sont pas encore clairement définis.



Les essais de classification des souches de *Bacillus thuringiensis* ont été nombreux et basés sur diverses méthodes telles que les profils d'estérases, l'analyse sérologique du cristal, les réactions d'agglutination des cellules avec des lécithines et les pathotypes. Actuellement, la classification des souches est basée sur le sérotypage des antigènes flagellaires. Plus de 55 sérotypes H sont actuellement reconnus (voir tableau 2, p. 361). Bien que chacun des sérotypes proposés soit qualifié de sous-espèce ou de variété, cette classification n'a pas véritablement de valeur systématique. Elle ne reflète pas non plus le spectre de toxicité de la souche, ce caractère étant déterminé par la composition du cristal en protéines insecticides et non par les antigènes flagellaires.

Seules quelques variétés font l'objet d'une commercialisation dans le monde ; trois sérotypes seulement sont utilisés actuellement pour lutter contre les ravageurs des cultures : le sérotype 3a, 3b (kurstaki), 7 (aizawa) et 8a, 8b (morrisoni) ; pour mémoire, le sérotype 14 (israelensis) est utilisé pour lutter contre les vecteurs de maladies humaines (voir plus loin).

Les  $\delta$ -endotoxines sont de loin le groupe de protéines insecticides le plus utilisé commercialement à l'échelle mondiale. Toutefois, d'autres métabolites secondaires ayant une activité toxique ou insecticide sont produits à un stade du développement de la bactérie et peuvent présenter dans certains cas un intérêt commercial [par exemple, la  $\beta$ -exotoxine ou thuringiensine et les toxines VIP (voir plus loin)]. La  $\beta$ -exotoxine a été utilisée principalement pour contrôler les populations de mouches (*Musca domestica* L.) dans les écuries, les stocks de fumiers des pays nordiques et de l'ex-URSS ou les latrines en Afrique, mais elle présente l'inconvénient majeur d'être toxique pour les vertébrés, ce qui fait qu'au moins dans les pays occidentaux, les préparations commerciales de *Bacillus thuringiensis* utilisées comme insecticides ne contiennent pas de souches productrices de  $\beta$ -exotoxine.

Chaque année, les produits à base de *Bacillus thuringiensis* sont utilisés sur plusieurs millions d'hectares pour lutter contre les Lépidoptères ravageurs en agriculture, forêts et denrées entreposées (voir tableau 3, p. 362).

LES CONTRAINTES AU DÉVELOPPEMENT DE *BACILLUS THURINGIENSIS* sont essentiellement liées à l'émergence de populations d'insectes résistantes. Le premier cas de résistance aux  $\delta$ -endotoxines de *Bacillus thuringiensis* décrit dans la littérature concerne la sélection en laboratoire d'une population du Lépidoptère *Plodia interpunctella* pour la résistance à Dipel®, un produit commercial formulé à partir d'une souche de *Bacillus thuringiensis* du sérotype kurstaki. La résistance acquise était de 100 fois en quinze générations. D'autres cas ont été décrits et la résistance à *Bacillus thuringiensis* concerne maintenant dix espèces de Lépidoptères, deux espèces de Coléoptères et trois espèces de Diptères. Cependant, la résistance à *Bacillus thuringiensis* est un phénomène encore rare dans la nature. Le premier cas de résistance apparu dans la nature sur l'île d'Hawaï a été rapporté en 1990. Il concerne *Plutella xylostella*, la Teigne des crucifères. Depuis, d'autres cas de résistance concernant cette même espèce

Tableau 2 – Liste des sérotypes de *Bacillus thuringiensis* (Juarez-Perez, 1998)

Sérotipe H	Sérovariété
1	thuringiensis
2	finitimus
3a, 3c	alesti
3a, 3b, 3c	kurstaki
3a, 3d	sumiyoshiensis
3a, 3d, 3e	fukuokaensis
4a, 4b	sotto
4a, 4c	kenyae
5a, 5b	galleriae
6	entomocidus
7	aizawai
8a, 8b	morrisoni
8a, 8c	ostrinae
8b, 8d	nigeriensis
9	tolworthi
10a, 10b	darmstadiensis
10a, 10c	londrina
11a, 11b	toumanoffi
11a, 11c	kyushuensis
12	thompsonii
13	pakistani
14	israelensis
15	dakota
16	indiana
17	tohokuensis
18a, 18b	kumamotoensis
18a, 18c	yosoo
19	tochigiensis
20a, 20b	yunnanensis
21	colmeri
22	shandongensis
23	japonensis
24a, 24b	neoleonensis
24a, 24c	novosibirsk
25	coreanensis
26	silo
27	mexicanensis
28a, 28c	jegathesan
29	alagienis
30	medellin
31	toguchini
32	cameroun
33	leesis
34	konkukian
35	seoulensis
36	malaysiensis
37	andaluciensis
38	oswaldocruzi
39	brasiliensis
40	huazhongensis
41	sooncheon
42	jinghongensis
43	guiyangensis
44	higo
45	roskildiensis
46	chanpaisis
47	wratislaviensis
48	balearica
49	muju
50	navarrensis
51	xiaguangensis
52	kim
53	asturiensis
54	polonensis
55	palmanyolensis



**Tableau 3 – Produits commercialisés à base de  $\delta$ -endotoxines de *Bacillus thuringiensis***

Variété <i>Bacillus thuringiensis</i>	Nom commercial	Firme	Cible
aizawai	Xentari, Florbac Agree, Design	Valent Biosciences Thermo-Trilogy	
aizawai, $\delta$ -endotoxines encapsulées	Maatch (kurstaki + aizawai)	Mycogen	Lépidoptères
galleriae	Spicturin	Tuticorin Alkali Chemicals & Fertilizers Limited	<i>Plutella xylostella</i>
israelensis	Bactimos, Vectobac, Gnatrol, Skeetal  Teknar Aquabac Vectocide Acrobe Bactis	Abbott Laboratories  Thermo-Trilogy Becker Microbial Products Sanex American Cyanamid Caffaro	Larves de Diptères (moustiques, simulies)
japonensis	M-Press	Mycogen	Coléoptères (sol)
kurstaki	Thuricide, Delfin, Javelin Able, CoStar, Vault CoStar Foray Biobit Bactospéine Dipel Bactosid Agrobac Larvo-BT, Troy-BT Biobest-BT Collapse Bactospéine Koppert Insectobiol Agrobac Cordalène Bactucide Baturad Forwardbit Biobest BT Collapse Condor (EG 2348) (transconjugant) Lepinox (EG 7826) Cutlass (EG 2371) Raven (EG 2424) Ecotech Bio (EG 2371) Ecotech Pro (EG 2348) Jackpot (EG 2424) Rapax (EG2348) Biocillis Bactifog Scutello Bacivers Batik	Thermo-Trilogy Thermo-Trilogy Thermo-Trilogy Valent Biosciences Valent Biosciences Valent Biosciences Sanex Tecomag Troy Biosciences Biobest Calliope Koppert Samabiol Tecomag Agrichem Caffaro Cequisa Forward International Biobest Calliope Ecogen Ecogen Ecogen Ecogen Ecogen/Aventis Ecogen/Aventis Ecogen/Intrachem Ecogen/Intrachem AgrSense Dreyfus-Herschel Biobest Goëmar Calliope/NPP	+ <i>Leptinotarsa decemlineata</i>
kurstaki, $\delta$ -endotoxines encapsulées	MVP, M-Peril (kurstaki-Cry1Ac) M-Trak (san diego-Cry3A) M/C (aizawai-Cry1c) Guardjet (kurstaki-Cry1Ac) Crymax (EG 7841)	Mycogen Mycogen Mycogen Mycogen/Kubota Ecogen	Lépidoptères, Coléoptères
kurstaki x aizawai			
tenebrionis	Novodor	Valent Biosciences	Coléoptères ( <i>Leptinotarsa decemlineata</i> )

Tableau 3 bis – Divers autres produits commerciaux

Autres bactéries insecticides commercialisées			
Bactérie	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Bacillus sphaericus</i>	Vectolex CG	Valent Biosciences	<i>Culex</i> spp.
<i>Serratia entomophila</i>	Invade	Coated Seed	<i>Costelytra zealandica</i>
Microsporidie entomopathogène			
Microsporidie	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Nosema locustae</i>	Nolo Bait	M & R Durango	Acridiens
	Grasshopper Control Gemaspore Bait	Beneficial Insect Company	
Champignon nématophage			
Champignon	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Myrothecium verrucaria</i>	DiTera	Valent Biosciences	<i>Meloidogyne</i> spp., <i>Heterodera</i> spp.

sont apparus en Floride, dans l'État de New-York, aux Philippines, en Thaïlande, en Malaisie et au Japon.

L'élaboration de stratégies permettant de prévenir ou de retarder l'apparition de cette résistance dans la nature est indispensable et devra nécessairement s'appuyer sur les connaissances acquises ou à venir concernant l'identification des mécanismes biochimiques et génétiques de la résistance.

Les autres contraintes concernent le problème de la persistance en champ et le perfectionnement des formulations (les techniques d'encapsulation sont très étudiées actuellement par les industriels).

**PERSPECTIVES :** L'apport des biotechnologies ouvre des voies jusqu'alors inaccessibles et laisse entrevoir de nouvelles utilisations comme celle de pouvoir traiter des ravageurs qui ne pourraient être maîtrisés par des pulvérisations d'insecticides classiques. Ainsi, de nouvelles stratégies d'exploitation des toxines insecticides de *Bacillus thuringiensis* sont actuellement mises en œuvre grâce au génie génétique, notamment la construction de microorganismes et de plantes génétiquement transformées pour leur faire exprimer des gènes codant pour les  $\delta$ -endotoxines.

À l'aide de quelques exemples, nous illustrerons l'ingéniosité des projets :

– Transformation de microorganismes avec un gène codant pour une delta-endotoxine : par exemple, le produit M-One Plus® (Mycogen) est issu d'une transformation génétique de *Pseudomonas fluorescens*. Le gène qui code pour la toxine CryIIIA, larvicide de Coléoptère, a été transféré dans la bactérie, après production des cristaux, la bactérie est tuée par un procédé physico-chimique, mais sa paroi demeure et sert d'enveloppe protectrice aux cristaux de *Bacillus thuringiensis*. Ce procédé permet d'améliorer de façon significative la durée de vie des cristaux dans la nature. Le produit est homologué aux États-Unis et en Europe.



— Des plantes transgéniques, modifiées par le transfert d'un gène codant pour une toxine de *Bacillus thuringiensis* ont été obtenues. La plante synthétise la toxine au cours de son développement et est ainsi protégée des attaques des ravageurs sensibles au gène de *Bacillus thuringiensis* introduit.

— La conception de souches recombinantes de *Bacillus thuringiensis* permet d'élargir le spectre d'activité à la fois aux Lépidoptères et aux Coléoptères : par exemple, Foil®, qui présente une activité larvicide sur Lépidoptères et Coléoptères, et de Agree®, qui est fabriqué à partir de gènes codant pour des toxines issues de deux sérotypes différents. Cette particularité permet aussi d'élargir le spectre d'activité à plusieurs familles de Lépidoptères. De tels biopesticides sont homologués aux États-Unis et en France, et plus largement en Europe.

Découvertes récemment, les toxines Vip3 « vegetative insecticidal proteins » sont des protéines exprimées à partir de la phase logarithmique de croissance de la bactérie et jusqu'à la sporulation, excrétée dans le milieu, sensibles à la température et d'une taille d'environ 80kDa. Des études génétiques ont montré que, sur un total de 463 souches de *Bacillus thuringiensis* analysées, environ 15 % portent au moins un des gènes codant pour ces protéines. Ces toxines sont actives contre plusieurs espèces de Lépidoptères, principalement *Agrotis ipsilon* et *Spodoptera* spp. Elles agiraient comme des poisons intestinaux qui entraînent dans un premier temps une paralysie de l'insecte puis la destruction de l'épithélium intestinal causant sa mort. Aucune information n'est encore disponible sur leur innocuité pour les insectes non cibles ou pour les vertébrés, ce qui fait que leur éventuelle utilisation commerciale n'est pas encore d'actualité.

Toutes les potentialités de cette bactérie ne sont sans doute pas encore connues et de nombreux chercheurs dans le monde s'emploient à découvrir de nouvelles activités contre les Invertébrés, soit encore d'améliorer les souches déjà utilisées. De ce fait, *Bacillus thuringiensis* présente de réelles perspectives de développement.

## DES BACTÉRIES POUR LUTTER CONTRE LES MALADIES DES PLANTES

Pour ce qui est des mécanismes généraux de lutte microbiologique contre les maladies cryptogamiques et bactériennes des plantes, on distingue deux types principaux : l'antagonisme microbien, qui implique des interactions directes entre l'agent de lutte et l'agent pathogène, et l'induction de résistance chez la plante hôte, qui implique une interaction indirecte entre agent de lutte et agent pathogène *via* la plante.

Les principaux modes d'action responsables de l'antagonisme microbien sont :



— L'HYPERPARASITISME : les deux exemples classiques sont celui de *Trichoderma* qui émet des suçoirs et finalement peut se développer aux dépens des hyphes de *Rhizoctonia solani* et celui de *Cryphonectria parasitica* « parasité » par des ARN double brin qui rendent les souches hypoaggressives (cet exemple est limité mais on a tendance à assimiler cela au parasitisme des champignons par des virus). Il y a beaucoup d'autres exemples, en particulier *Ampelomyces quisqualis*, les parasites de sclérotés : *Coniothyrium*, *Sporidesmium*...

— LA COMPÉTITION pour les éléments nutritifs indispensables à la croissance, par exemple, la compétition pour le carbone entre souches pathogènes et non pathogènes de *Fusarium oxysporum*, pour le fer entre *Pseudomonas* producteurs de sidérophores et bactéries ou champignons pathogènes, mais aussi compétition pour les sites d'infections racinaires entre les *Fusarium* pathogènes et non pathogènes. La caractéristique principale de la compétition est d'être un mode d'action qui nécessite la présence simultanée des deux protagonistes dans la même niche écologique, il n'y a pas d'action à distance.

— L'ANTIBIOSE, c'est-à-dire la production par l'agent de lutte biologique de métabolites toxiques pour l'agent pathogène. Ces métabolites étant excrétés hors de la cellule microbienne, on peut concevoir que ce mode d'action ne nécessite pas un contact étroit entre les deux protagonistes. La liste des microorganismes produisant des substances toxiques vis-à-vis des champignons ou des bactéries est extrêmement longue ; si on veut n'en citer que quelques-uns : *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Agrobacterium radiobacter*, *Trichoderma*, *Gliocladium*. Les molécules responsables de l'activité antagoniste sont de nature chimique très variée.

Dans le cas de l'induction de résistance, l'agent de lutte biologique déclenche chez la plante des mécanismes de défense qui s'opposent au développement de l'infection par l'agent pathogène. Les mécanismes sont de nature diverse : épaississement des parois végétales, productions de molécules de défense telles que phytoalexines et PR protéines. Cette induction de résistance peut rester localisée ou au contraire s'étendre à toute la plante ; on parle alors d'induction systémique de résistance ; les conséquences pour l'agent pathogène de ces différents mécanismes exprimés par les agents de lutte biologique sont : un arrêt de son développement, qui n'entraîne pas nécessairement sa mort ni même une diminution de la densité d'inoculum, soit une inhibition de son activité infectieuse, soit enfin mais plus rarement sa lyse. La fongistase, phénomène qui correspond à une inhibition biologique de la germination des spores fongiques dans le sol, résulte essentiellement de l'activité des agents de lutte biologique,



qu'ils agissent par compétition trophique ou par antibiose. Il est certain qu'une fongistase prolongée entraînera la mort et donc la lyse de certains agents pathogènes. Il faut insister sur le fait que ces différents modes d'action ne sont pas incompatibles ; au contraire, ils sont complémentaires et une même espèce voire une même souche d'agent de lutte biologique peut posséder plusieurs de ces modes d'action ; par exemple, *Trichoderma* possède la capacité à produire des métabolites toxiques, à parasiter certains autres champignons, à entrer en compétition pour les éléments nutritifs et pour les sites de colonisation, voire à induire la résistance de la plante hôte. De même, les *Pseudomonas* qui entrent en compétition pour le fer produisent de très nombreux antibiotiques et induisent la résistance de la plante.

Les bactéries qui ont montré un potentiel pour la lutte contre les maladies des plantes incluent de nombreux genres ; nous ne parlerons ici que des agents bactériens pour lesquels nous disposons de données écologiques approfondies. Pour l'instant, la lutte biologique a été utilisée avec plus de succès contre les maladies souterraines que dans la phyllosphère. Les dégâts causés par les pathogènes du sol se sont accrus ces 30 dernières années, entraînant une importante réduction de rendement des cultures. Actuellement, il n'y a pas de méthodes satisfaisantes de lutte et il n'y a qu'un faible nombre de variétés résistantes aux pathogènes du sol qui soient commercialisées. C'est pourquoi, la lutte biologique contre les maladies souterraines peut être considérée comme une alternative d'avenir (voir tableau 4, p. 367).

Les Bactéries du genre *Pseudomonas* bénéficient d'une attention particulière car quelques grammes ou milligrammes/ha suffisent pour l'amélioration du rendement. Parfois contradictoires et irréguliers, ces effets utiles sont abondamment illustrés dans la littérature, par contre, les mécanismes d'action ne sont que partiellement décrits. Cette connaissance est pourtant essentielle si on veut faire des épandages fiables à grande échelle. C'est ainsi que les résultats positifs obtenus en conditions de laboratoire et sous serres expérimentales tendent à devenir plus variables en serres commerciales et en conditions de plein champ, car, d'une part les *Pseudomonas* sont instables pendant leur conservation et au cours de leur production à grande échelle, et d'autre part ils sont très sensibles aux facteurs environnementaux.

Les Actinomycètes (notamment du genre *Streptomyces*) sont des microorganismes communs du sol qui produisent des antibiotiques et autres métabolites secondaires ; ils sont principalement saprophytes et utilisent des débris organiques insolubles en produisant des enzymes hydrolytiques extracellulaires. Ils s'adaptent aussi à leurs environnements en formant des hyphes qui pénètrent dans les substrats et permettent aux enzymes d'être sécrétées. Du fait de leur capacité à coloniser le sol et leur aptitude à produire des composés antimicrobiens, les souches de *Streptomyces* sont des agents de lutte biologique potentiels prometteurs ; d'ailleurs, certaines espèces ont été étudiées pour leur potentiel à contrôler un grand nombre de pathogènes de plantes dans différents systèmes.



Tableau 4

Bactérie	Nom commercial	Firme	Cible
Préparations commerciales à base de bactéries utilisées contre les agents phytopathogènes			
<i>Agrobacterium radiobacter</i> « souche 84	Nogall, Diegall Galltrol-A Norbac 84c	Bio-Care Technology AgBioChem IPM Laboratories	<i>Agrobacterium tumefaciens</i> « «
<i>Bacillus subtilis</i> « FZB24	Epic, Kodiak, Kodiak HB, Kodiak AT Rhizo-Plus, Rhizo-Plus Konz	Gustafson Inc. KFZB Biotechnik GmbH	<i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Fusarium</i> spp., <i>Alternaria</i> , <i>Aspergillus</i> spp. <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Fusarium</i> spp., <i>Alternaria</i> spp., <i>Sclerotinia</i> , <i>Verticillium</i> , <i>Streptomyces scabie</i> Pathogènes de semences
« GB03	System 3	Helena Chemical Co	
<i>Bacillus subtilis</i>	Serenade	Agraquest	Autorisation attendue fin 1999
<i>Erwinia carotovora</i>	Biokeeper	Nissan	<i>Erwinia carotovora</i>
<i>Pseudomonas aureofaciens</i> souche TX-1	SpotLess	EcoSoil Systems	Maladies de la tourbe
<i>Pseudomonas cepacia</i>	Deny Intercept	Stine Microbial Products Soil Technologies Corp.	<i>Fusarium</i> , <i>Pythium</i> , <i>Rhizoctonia</i> «
<i>Pseudomonas chloraphis</i>	Cedomon	Bioagro	
<i>Pseudomonas fluorescens</i> A506	BlightBan A506	Plant Health Technologies	<i>Erwynia amylovora</i>
<i>Pseudomonas fluorescens</i> , souche NCIB 12089	Victus	Sylvan Spawn Lab.	<i>Pseudomonas tolaassii</i>
<i>Pseudomonas gladioli</i>	AM301, Camperico	Japan Tobacco	<i>Poa annua</i>
<i>Pseudomonas solanacearum</i> (non pathogène)	PSSOL	NPP	<i>Pseudomonas solanacearum</i>
<i>Pseudomonas syringae</i> ESC-10	Biosave 100, Biosave 1000	Ecoscience Corp.	<i>Botrytis cinerea</i> , <i>Penicillium</i> spp., <i>Mucor pyroformis</i> , <i>Geotrichum</i> <i>candidum</i>
<i>Pseudomonas syringae</i> ESC-11	Biosave 110	Ecoscience Corp.	«
<i>Pseudomonas tolaassii</i>	Phagus	NPP	<i>Agaricus</i> spp., <i>Pleurotus</i> spp.
Préparations commerciales à base d'Actinomycètes			
<i>Streptomyces aureus</i> souche S-3466	Mitecidin	Eikou Kasei	<i>Tetranychus cinnabarinus</i> , <i>T. urticae</i> , <i>Panonychus ulmi</i>
<i>Streptomyces cacaoi</i> var. <i>asoensis</i>	Polyoxin AL	Kaken, Kumiai, Nihon Nohyaku, Hokko	<i>Sphaerotheca</i> spp., <i>Botrytis cinerea</i> , <i>Sclerotinia</i> <i>sclerotiorum</i> , <i>Corynespora melonis</i> , <i>Cochliobolus miyabeanus</i> , <i>Alternaria alternata</i>
<i>Streptomyces griseochromogenes</i>	Bla-S	Kaken	<i>Pyricularia oryzae</i>
<i>Streptomyces griseoviridis</i>	Mycostop	Kemira Agro Oy	<i>Alternaria brassicola</i> , <i>Phomopsis</i> spp., <i>Botrytis</i> spp., <i>Phytophthora</i> spp., <i>Fusarium</i> spp., <i>Pythium</i> spp.
<i>Streptomyces griseus</i>	Agrimycin 17 AS-50	Novartis	Bactéries phytopathogènes
<i>Streptomyces hygroscopicus</i>	Meiji Herbiace	Meiji Seika	Mauvaises herbes
<i>Streptomyces hygroscopicus</i> subsp. <i>aureolacrimosus</i>	Milbeknock	Sankyo	Acariens (citrus, thé, aubergines)
<i>Streptomyces hygroscopicus</i> var. <i>limoneus</i>	Validacin, Solacol, Valimun Mycin	Takeda Sanonda	<i>Rhizoctonia</i> spp. «
<i>Streptomyces kasugaensis</i>	Kasugamin, Kasumin	Hokko	<i>Pyricularia oryzae</i> , <i>Cercospora</i> spp., <i>Venturia</i> spp.
<i>Streptomyces natalensis</i> , <i>Streptomyces chattanoogensis</i>	Delvolan	Gist-Brocades	<i>Fusarium oxysporum</i>
<i>Streptomyces rimosus</i>	Mycoshield, Terramycin	Novartis	<i>Erwynia amylovora</i> + maladies causées par <i>Pseudomonas</i> et <i>Xanthomonas</i>
<i>Streptoverticillium</i> <i>rimofaciens</i> , souche B-98891	Mildiomycin	Takeda	Powdery mildews



## les champignons

### LES CHAMPIGNONS UTILISÉS DANS LA LUTTE CONTRE LES PHYTOPATHOGENES (BIOFONGICIDES)

Les biofongicides représentent un marché (ventes) de 1 million de \$/an (le marché global des fongicides = 4,1 milliards de \$).

La plupart des champignons utilisés en lutte biologique contre la fonte des semis et la pourriture racinaire sont des hyphomycètes et, parmi ceux-ci, les genres *Penicillium*, *Trichoderma* et *Gliocladium* ont reçu le plus d'attention (voir tableau 5, p. 369). Les mycoparasites *Pythium* spp. et *Fusarium* spp. ont des souches non pathogènes, qui sont aussi des agents de lutte biologique potentiels.

**MODE D'ACTION :** Plusieurs mécanismes sont importants dans les interactions antagonistes, notamment le mycoparasitisme et la compétition pour les substrats et les sites d'infection.

**ÉVALUATION DES RISQUES :** Certaines souches de *Gliocladium* peuvent produire des métabolites secondaires toxiques pour les mammifères ; d'autres peuvent avoir des effets herbicides ; de plus, des métabolites de *Trichoderma* et *Gliocladium* peuvent avoir un effet délétère sur d'autres microorganismes utiles dans le sol ; tout cela nécessite donc une étude approfondie et les risques de lâcher volontaire d'un antagoniste doivent être évalués dans chaque cas.

Le risque existe que, parmi les souches préconisées, certaines appartiennent à des espèces connues pour leur pouvoir pathogène à l'égard de plantes cultivées. Donc, pour bien évaluer les risques, il faut comprendre pourquoi les souches préconisées ont perdu leur agressivité (ou ne l'ont jamais eue) et quelle est la probabilité que par croisement dans le sol elles récupèrent cette capacité.

Cela explique pourquoi ces organismes n'ont pas encore été homologués en Europe, contrairement aux États-Unis.

**MÉTHODES DE PRODUCTION** (les mêmes méthodes s'appliquent aux champignons entomopathogènes) :

La fermentation en milieu liquide, grâce à laquelle est réalisée la production de masse de nombreux auxiliaires biologiques, est moins bien adaptée à la production des champignons, certaines espèces sporulant difficilement dans ces conditions. On peut alors recourir à une fermentation solide. Le substrat peut être constitué par des résidus de faible valeur marchande (bagasse de canne à sucre, son, paille hâchée, pulpe de betterave etc.) humidifiés par une solution nutritive contenant essentiellement de l'azote. Cette technique est cependant encore peu utilisée à l'échelle industrielle. Elle peut être utilisée pour une production artisanale d'inoculum. Une fois produite, la biomasse doit être conditionnée sous une forme qui favorise au mieux sa survie tout en permettant un usage facile. La présentation ne sera pas la même selon que la préparation est destinée à enrober des semences (poudre mouillable) ou à être introduite

Suite p. 370

Tableau 5

Champignons	Nom commercial	Firme	Cible
Préparations commerciales à base de champignons utilisés contre les agents phytopathogènes			
<i>Ampelomyces quisqualis</i> (isolate M-10)	AQ10	Ecogen	Oïdium
<i>Candida oleophila</i> I-182	Aspire	Ecogen	<i>Penicillium</i> spp., <i>Botrytis</i> spp.
<i>Chondostereum purpureum</i>	Biochon	Koppert	Ravageurs arbres forestiers
<i>Coniorthyrium minitans</i>	Contans Koni	Prophyta BIOVED Ltd.	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i> , <i>S. minor</i> «
<i>Endothia parasitica</i>	<i>Endothia parasitica</i>	CNICM	<i>Endothia parasitica</i>
<i>Fusarium oxysporum</i> (non pathogène)	Biofox C Fusaclean L, G	SIAPA NPP	<i>Fusarium moniliforme</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> <i>Fusarium oxysporum</i>
<i>Gliocladium catenulatum</i>	PreStop, Primastop	Kemira Agro Oy	<i>Pythium</i> spp., <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Botrytis</i> spp., <i>Didymella</i> spp.
<i>Gliocladium virens</i> GL-21	Soil Guard	Thermo Trilogy	<i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Pythium</i> spp.
<i>Gliocladium</i> spp. <i>Phlebiopsis gigantea</i>	Gliomix Rotstop	Kemira Agro Oy Kemira Agro Oy	« <i>Heterobasidium annosum</i>
<i>Pythium oligandrum</i>	Polygandron	Plant Production Institute	<i>Pythium ultimum</i>
<i>Trichoderma harzianum</i>	Supresivit Trichodex	Fytovita, Borregard & Reitzel Makhteshim Chemical Works	Champignons <i>Botrytis cinerea</i>
<i>Trichoderma harzianum</i> (ATCC 20475)	Harzan Promote	NPP H Biotech	<i>Botrytis</i> spp., <i>Sclerotinia</i> spp. <i>Pythium</i> spp.
<i>Trichoderma harzianum</i> Rifai souche KRL-AG2	Binab T T-22G, T-22 Planter Box, T-22 HB	Bio-Innovation AB Bioworks Inc.	Champignons <i>Pythium</i> spp., <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Fusarium</i> spp., <i>Sclerotinia homeocarpa</i>
<i>Trichoderma polysporum</i> (ATCC 20475)	«	«	«
<i>Trichoderma</i> sp.	Trichoderma 2000	Mycontrol	<i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Sclerotium rolfsii</i> , <i>Pythium</i> spp., <i>Fusarium</i> spp.
<i>Trichoderma</i> spp.	Bio-Fungus	Grondortsmettingen, DeCuester n.v.	<i>Sclerotinia</i> , <i>Phytophthora</i> , <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Pythium</i> spp., <i>Fusarium</i> , <i>Verticillium</i>
<i>Trichoderma harzianum</i> & <i>Trichoderma viride</i>	Trichopel, Trichobject, Trichodowels, Trichoseal	Agrimm Technologies	<i>Armillaria</i> , <i>Botryosphaeria</i> , <i>Chondrostereum</i> , <i>Fusarium</i> , <i>Nectria</i> , <i>Phytophthora</i> , <i>Pythium</i> , <i>Rhizoctonia</i>
<i>Trichoderma viride</i>	Promote	H Biotech	<i>Pythium</i> spp., <i>Rhizoctonia solani</i> , <i>Fusarium</i> spp.
<i>Verticillium dahliae</i>	Dutch Trig	Heidemij	Maladie de l'orme



dans le sol (poudre mouillable ou granulés, ou inoculum encapsulé dans des polymères). Ces préparations peuvent demeurer actives pendant plusieurs mois si on les maintient dans une chambre froide (vers 5°C) mais le taux de propagules viables diminue généralement rapidement si elles sont conservées à température ambiante. Ce problème de la conservation de la viabilité et des propriétés de l'inoculum constitue un des freins à l'emploi de ces auxiliaires.

**PERSPECTIVES :** Récemment, la firme Ecogen Inc. a développé avec succès le biofongicide AQ10, basé sur l'utilisation d'*Ampelomyces quisqualis*, un champignon hyperparasite infestant seulement des Erysiphaceae (oïdium). Il a été autorisé aux États-Unis en 1994 sur différentes plantes hôtes et en France en 1998 sur vigne. Les efforts se concentrent maintenant sur des programmes d'applications expérimentales en vignobles, avec des essais pilotes.

### LES CHAMPIGNONS ENTOMOPATHOGENES

Les champignons entomopathogènes, importants dans la régulation naturelle de nombreux insectes ravageurs, n'ont pas connu le même succès ces vingt dernières années que d'autres auxiliaires tels que *Bacillus thuringiensis* ou certains baculovirus, mais leur potentiel pour lutter contre les acariens et les insectes dans les habitats naturels a souvent été reconnu. Seuls quelques-uns d'entre eux ont été utilisés à une échelle industrielle (des genres *Beauveria*, *Metarhizium*, *Verticillium* et *Paecilomyces*). Les programmes les plus importants de lutte microbiologique à l'aide de champignons ont lieu dans les pays en développement (au Brésil dans des champs de canne à sucre contre *Mahanarva posticata*, en Chine dans des forêts de pins et des champs de maïs contre *Dendrolimus punctatus* et *Ostrinia furnacalis*, à Cuba...). Dans les pays occidentaux, de telles méthodes alternatives de lutte sont utilisées parallèlement aux pesticides chimiques, bon marché et efficaces. De ce fait, seul un petit nombre d'espèces de ravageurs sont visées : Scarabéides, Curculionides, aleurodes, thrips, y compris certains insectes qui sont devenus résistants du fait de l'utilisation inadéquate des insecticides chimiques (Noctuides), certains ravageurs sensibles aux préparations granulées (pyrales, Lépidoptères et insectes de la canne à sucre et du riz, insectes souterrains), certains ravageurs des cultures légumières et fruitières (voir tableau 6, p. 371).

**MODE D'ACTION :** Contrairement aux autres microorganismes, les champignons infectent les insectes par pénétration directe à travers la cuticule. Les conidies adhèrent à l'insecte, germent et pénètrent à travers la cuticule. Le champignon croît rapidement dans l'hémocèle. Les insectes meurent dans un délai de 3 à 10 jours. Quand l'insecte meurt, le champignon entre dans un stade hyphal, colonise les organes internes puis sporule à la surface de l'insecte.

**PRODUCTION DE MASSE :** Les champignons entomopathogènes peuvent être produits actuellement de différentes façons : par méthode simple en sacs



Tableau 6

Champignons	Nom commercial	Firme	Cible
<b>Préparations commerciales à base de champignons entomopathogènes</b>			
<i>Beauveria bassiana</i>	Ostrinil	NPP	<i>Ostrinia nubilalis</i>
«	Mycotrol GH	Mycotech	Criquets
«	Mycotrol WP	Mycotech	Aleurodes, pucerons, Thrips
«	BotaniGard	Mycotech	Thrips (serre, pépinière)
«	CornGuard	Mycotech	
«	Naturalis-L, -O, -T	Troy Bioscience	Ravageurs du cotonnier
«	Ago Biocontrol Bassiana	Ago Biocontrol	
<i>Beauveria brongniartii</i>	Betel	Betel Réunion	<i>Hoplochelus marginalis</i>
«	Engerlingspilz	Andermatt	<i>Melolontha melolontha</i>
<i>Metarhizium anisopliae</i>	Bioblast	Ecoscience, Terminex	Blattes, termites
<i>Metarhizium flavoviride</i>	Greenmuscle	IIBC Biological Control Products	Criquets
<i>Paecilomyces fumosoroseus</i>	Pfr97	Thermo Trilogy	Aleurodes (serre)
«	PreFeRal	Biobest NV	
<i>Verticillium lecanii</i>	Mycotal	Koppert	Aleurodes, Thrips
«	Vertalec	Koppert	Pucerons
«	Ago Biocontrol Verticillium	Ago Biocontrol	
<b>Champignon nématophage commercialisé</b>			
<i>Myrothecium verrucaria</i>	DiTera	Abbott	<i>Meloidogyne</i> spp. <i>Heterodera</i> spp.

plastiques en utilisant comme milieu du riz stérile, des grains ou autres produits, en fermentation liquide sur des milieux bien définis, ou en fermenteurs semi-solides. Dans les deux cas, de grandes quantités de spores sont nécessaires pour arriver à une bonne lutte en plein champ, généralement de l'ordre de  $10^{14}$  spores/ha ou plus. Pour produire de telles quantités, au moins 100 kg de grains ou de riz sont nécessaires.

La fermentation solide présente l'avantage, puisque la plupart des champignons sporulent sur des substrats solides, d'être facile à réaliser en laboratoire ; de plus, les propagules produites étant dans un environnement aérien, les conidies ont tendance à être plus tolérantes à la dessiccation et plus stables comme préparation sèche, par comparaison aux spores produites en culture profonde. Malheureusement, les méthodes de fermentation solide présentent de nombreuses contraintes techniques et économiques (problèmes de stérilisation des substrats, échanges de gaz, contrôle de température, maintenance d'une culture pure et récupération du produit à partir du substrat) ; il faut alors, soit que les cultures impliquées soient de haute valeur ajoutée (légumes, cotonnier), que la concentration des spores produites sur le substrat solide soit très importante, ou que la main-d'œuvre soit bon marché (cas de la production dans les pays du Tiers-Monde). Actuellement, la fermentation liquide est la méthode la plus économique ; elle assure un environnement nutritionnel homogène et les facteurs environnementaux (pH, température, aération) sont facilement



contrôlés par rapport à d'autres méthodes. Pour avoir les conditions optimales de production, on doit considérer non seulement le rendement en propagules mais aussi la stabilité des propagules (tolérance à la dessiccation, durée de vie) et leur efficacité. La technologie de production et la formulation sont donc très interdépendantes. Les formulations granulées peuvent être obtenues soit par enrobage des spores préalablement récoltées, soit par croissance et sporulation du germe à la surface d'un support nutritif granulé ; ce premier procédé, déjà appliqué à de nombreux microorganismes auxiliaires, facilement industrialisable, est encore très insuffisamment éprouvé au champ pour les champignons entomopathogènes et ses perspectives d'utilisation agronomique ne peuvent donc pas être précisément estimées.

DIFFÉRENTES STRATÉGIES DE LUTTE sont souvent étudiées expérimentalement. Parmi celles-ci, les traitements inondatifs, presque semblables à ceux utilisés pour les insecticides chimiques, sont les plus communs. Par contre, la méthode d'introduction-acclimatation est encore l'exception dans les stratégies de lutte microbiologique.

De nombreux facteurs affectent l'efficacité des champignons entomopathogènes : leur potentiel comme agents de lutte biologique résulte des propriétés des populations de l'hôte et du pathogène et des conditions du milieu. Ces facteurs interagissent. Certains sont liés au pathogène : virulence et spécificité de l'hôte (= deux éléments essentiels dans le choix d'un bon candidat à la lutte microbiologique), potentiel épizootique, capacité de survie et polymorphisme génétique des populations fongiques. D'autres dépendent de l'hôte : variabilité de la sensibilité des populations hôtes, facteurs internes affectant la sensibilité de l'hôte (influence du stade de développement), facteurs des populations hôtes (densité de populations). Enfin, la sensibilité extrême aux conditions environnementales (rayonnement solaire, température, humidité) est le principal inconvénient des champignons entomopathogènes. Ces facteurs influencent la physiologie du champignon, sa capacité à infecter l'hôte, la progression de l'infection au sein de l'hôte vivant ou mort, la sporulation sur le cadavre, la capacité de dispersion et de survie des propagules fongiques infectieuses, mais aussi la sensibilité ou la résistance de l'hôte à l'infection.

Un des facteurs les plus cruciaux dans l'utilisation pratique des champignons est leur persistance relativement courte à la surface des feuilles. Des durées de vie de deux jours sont signalées et on considère généralement que les composantes proche-UV de la lumière solaire sont un facteur-clé dans ce domaine. Il faut noter cependant que, malgré son effet nocif sur la persistance, la lumière peut stimuler certaines étapes du cycle évolutif des champignons entomopathogènes cultivés *in vitro* ou *in vivo*. D'autres facteurs affectent la persistance des pathogènes fongiques : notamment des caractéristiques du sol (matière organique, inorganique, saturation de l'eau, température, microflore et microfaune antagonistes, pH), ou des ressources nutritives.



On peut espérer que la connaissance approfondie des contraintes microclimatiques permettra d'en surmonter certaines par une formulation améliorée, par la sélection de souches ou par une meilleure prévision des processus.

**PERSPECTIVES :** La manipulation des génomes de champignons a pris beaucoup de retard par rapport à celle des baculovirus et des bactéries. C'est ainsi que, malgré de sensibles progrès, la recombinaison parasexuelle qui constitue un outil important d'amélioration des champignons se heurte toujours aux difficultés de description précise du phénomène par suite de manques de marqueurs génomiques. Par ailleurs, le développement des champignons comme agents de lutte nécessite une meilleure compréhension de la dynamique ravageur-pathogène. L'identification des facteurs-clés qui ont un rôle dans la dynamique des interactions ravageur-pathogène peut être difficile. Dans ce contexte, les modèles mathématiques de populations peuvent fournir des outils utiles. Les modèles peuvent être utilisés pour des études épizootiologiques ou encore pour programmer des applications d'insecticides microbiens, pour estimer les doses nécessaires, pour prédire les temps léthaux, pour estimer l'impact du rayonnement solaire sur la survie des spores etc.

### DES CHAMPIGNONS POUR LUTTER CONTRE LES MAUVAISES HERBES (MYCOHERBICIDES)

Pour les principales espèces de mauvaises herbes pour lesquelles les moyens de lutte traditionnels ne sont pas assez efficaces, le développement de méthodes de lutte intégrée est essentiel.

Le coût économique des mauvaises herbes dans un pays particulièrement concerné, l'Australie, a été estimé en 1996 à 5 000 millions de \$ (J.-H. Combellack, communic. pers. in Groves, 1997).

La lutte biologique contre les mauvaises herbes avec des agents phytopathogènes est étudiée depuis une centaine d'années.

Les cinq espèces choisies comme cibles principales par le programme européen COST-816 (Müller-Schäre, 1997) sont : *Amaranthus* spp., *Convolvulus arvensis*, *Chenopodium album*, *Senecio vulgaris* et *Orobanche* spp.

Les champignons sont actuellement les pathogènes les plus susceptibles d'être efficaces car ils sont faciles à manipuler et ont la capacité de pénétrer d'eux-mêmes une plante hôte.

Ils sont appliqués en lâchers inondatifs : on disperse uniformément et régulièrement une abondante quantité d'inoculum sur une population de mauvaises herbes dans le but de provoquer rapidement une épidémie chez les plantes.



Les champignons pathogènes qui semblent prometteurs actuellement contre les espèces citées ci-dessus sont :

<i>Aposphaeria amaranthi</i>	pour lutter contre	<i>Amaranthus albus</i>
<i>Phomopsis amaranthicola</i>	«	<i>Amaranthus</i> spp.
<i>Stagonospora</i>	«	<i>Convolvulus arvensis</i>
<i>Aschochyta caulina</i>	«	<i>Chenopodium album</i>
<i>Puccinia lagenophorae</i> (rouille)	«	<i>Senecio vulgaris</i>

CONTRAINTES TECHNOLOGIQUES À LEUR DÉVELOPPEMENT : Toutefois, la production en masse d'un grand nombre de propagules viables, infectieuses et génétiquement stables pose quelques difficultés déjà évoquées. Les spores actuellement commercialisées sont produites en fermentation liquide, mais d'autres méthodes de production de masse restent à concevoir.

Une formulation adéquate est une des plus grandes contraintes du développement de bioherbicides efficaces, car les délais requis vont de un à deux ans de stabilité et de conservation.

Le marché d'un bioherbicide spécifique d'une seule mauvaise herbe est souvent considéré comme trop restreint et trop régional pour couvrir les frais d'homologation et de production de masse. L'implication des firmes privées dans le développement de ces produits est donc limité. Pourtant, les coûts de développement et d'homologation des bioherbicides sont bien moindres que ceux des herbicides chimiques. Par exemple, le produit Collego (qui a par la suite connu un échec commercial, voir ci-dessous) coûtait approximativement 2 millions de \$ en recherche et développement dans les années 70 et 80 contre 15 à 20 millions de \$ pour un herbicide chimique à ce moment là (voir tableau 7).

Tableau 7 — Mycoherbicides commercialisés  
(tous les trois ont été retirés de la vente pour des raisons commerciales)

Champignons	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Colletotrichum gloeosporioides</i> f. sp. <i>aeschynomene</i>	Collego	Abbott	<i>Aeschynomene virginica</i>
« f. sp. <i>malvae</i>	BioMal	Abbott	
<i>Phytophthora palmivora</i>	DeVine	Abbott	<i>Morenia odorata</i>

Un exemple de frein au développement de ces produits, est le cas d'*Amaranthus* : il y a un conflit d'intérêt entre le besoin d'une lutte biologique efficace contre les espèces nuisibles d'*Amaranthus* et d'autre part la valeur potentielle de certaines espèces d'amaranthe cultivées, d'où la nécessité de résoudre ce problème et de veiller à ce que les agents utilisés dans la lutte biologique contre les espèces nuisibles ne mettent pas en danger les espèces cultivées.

Trois bioherbicides ont été homologués jusqu'à maintenant :

- DeVine®, à base de *Phytophthora palmivora*,  
pour lutter contre *Morrenia palmivora* sur *Citrus* ;
- Collego®, à base de *Colletotrichum gloeosporioides f.sp. aeshynomene*,  
pour lutter contre *Aeshynomene virginica* sur riz et soja ;
- BioMall®, à base de *Colletotrichum gloeosporioides f.sp. malvae*,  
pour lutter contre *Malva pusilla*.

Bien qu'ils aient prouvé leur efficacité, deux de ces produits ont été retirés du marché, Collego® (commercialisé en 1992 et arrêté en 1994), et Biomall®, à cause de leur faible marché potentiel. Dans chacun des cas, la cible était une seule espèce de mauvaise herbe.

## les virus entomopathogènes (baculovirus)

Les Baculovirus, ou virus responsables des polyédroses nucléaires, sont des virus exclusivement pathogènes d'Invertébrés — Ils ont pour cible plus de 3 000 espèces d'insectes — C'est pourquoi depuis de nombreuses années, on a cherché à les utiliser comme bioinsecticides. Malgré de nombreux essais, la lutte biologique à l'aide de ces virus n'a pas pu s'imposer comme une méthode susceptible de remplacer les insecticides chimiques, essentiellement en raison du coût économique de leur production de masse. Cependant leur emploi reste probable dans les années à venir, du fait de leur spécificité et de leur innocuité.

Les baculovirus sont de gros virus en bâtonnet dont le génome est constitué d'une molécule circulaire d'ADN bicaténaire de haut poids moléculaire ( $70-85 \times 10^6$  daltons). Ils forment au cours de l'infection dans le noyau des cellules des corps d'inclusion, les polyèdres. Chaque polyèdre inclut de nombreuses particules virales entourées d'une matrice protéique composée principalement d'un simple polypeptide, la polyédrine. Dans la nature, les polyèdres sont ingérés par les insectes, puis dégradés par les protéases du tube digestif, les virions libérés vont traverser les cellules intestinales pour se multiplier dans les hémocytes et dans le tissu adipeux. C'est en fin de cycle que les noyaux renferment de très nombreux polyèdres. Si ceux-ci représentent principalement la forme d'infection de larve à larve, à l'intérieur de l'insecte comme *in vitro* les virions sont transmis de cellule à cellule par exocytose.

La production de masse, sous la forme de polyèdres contenant des virus infectieux, a été mise au point pour le baculovirus de la noctuelle *Mamestra brassicae*. La multiplication des virus ne pouvant être assurée qu'au sein de cellules hôtes



Tableau 8 — Préparations commerciales à base de virus entomopathogènes

Type de virus * ou nom	Nom commercial	Firme	Cible
NPV	Mamestrin	NPP	<i>Mamestra brassicae</i> , <i>Helicoverpa armigera</i> , <i>Plutella xylostella</i> , <i>Phthorimaea operculella</i> , <i>Lobesia botrana</i>
NPV	Spodopterin	NPP	<i>Spodoptera littoralis</i>
NPV	Anagrapha falcifera NPV	Thermo Trilogy	Larves Lépidoptères
NPV <i>Anticarsia gemmatilis</i>	Polygen	Agrogen S/A Biol. Ag.	<i>Anticarsia gemmatilis</i> , <i>Diatraea saccharalis</i>
	Multigen	EMBRAPA	"
NPV <i>Autographa californica</i>	VPN 80	Agricola El Sol	Larves Lépidoptères
	Gusano	Thermo Trilogy	"
NPV <i>Helicoverpa zea</i>	GemStar	Thermo Trilogy	<i>Heliothis</i> sp., <i>Helicoverpa</i> sp.
NPV <i>Lymantria dispar</i>	Gypcheck	US Forestry Service	<i>Lymantria dispar</i>
NPV <i>Neodiprion sertifer</i> / <i>N. lecontei</i>	Neochek-S	US Forest Service	<i>Neodiprion</i> spp.
"	Leconteivirus	Canadian Forestry Service	"
"	Monisarmiovirus	Kemira	"
"	Virox	Oxford Virology	"
NPV <i>Spodoptera exigua</i>	Spod-X	Thermo Trilogy/ Brinkman	<i>Spodoptera exigua</i>
"	Ness-A, Ness-E	Applied Chemicals	"
NPV <i>Syngrapha falcifera</i>	en cours de commercialisation	Syngenta/ Thermo Trilogy	<i>Heliothis</i> sp., <i>Helicoverpa</i> sp.
GV <i>Cydia pomonella</i>	Carpovirusine	Calliope/NPP	<i>Cydia pomonella</i>
"	Granupom	Aventis	"
"	Madex 3	Andermatt Biocontrol	"
"	Carposin	Agrichem	"
"	Cyd-X	Thermo Trilogy	"
GV	Capex	Andermatt Biocontrol	<i>Adoxophyes orana</i>

\* NPV = Virus à polyédrose nucléaire ; GV = Virus granulose

vivantes, le procédé repose sur la maîtrise d'un élevage de masse de l'insecte sur milieu nutritif artificiel. À titre d'exemple, pour traiter efficacement 1 ha de culture, il faut en moyenne  $10^{12}$  à  $10^{13}$  polyèdres, ce qui, si l'on prend une valeur moyenne de 109 polyèdres/larve d'insecte, correspond à 1 000 ou 10 000 chenilles virosées. Autre exemple concernant la production de masse de la granulose du Carpocapse *Cydia pomonella* : le prix de revient à l'hectare se situe autour de 61 F. Une autre donnée concerne le prix de revient de l'application de Gemstar® (NPV d'*Helicoverpa zea*), qui serait de 17 \$/ha. Les recherches portent actuellement sur la mécanisation des différentes manipulations pour réduire la main-d'œuvre nécessaire et rendre le coût de la matière active compétitif avec les insecticides chimiques. L'association de cette préparation virale à des quantités réduites de pyrèthrinoïdes provoque un phénomène de synergie d'action. Dans ces conditions, il est possible de réduire très sensiblement la quantité d'inoculum viral à mettre en œuvre, ce qui ouvre des perspectives nouvelles au développement pratique de cette méthode de lutte.

Le mode d'action hautement spécifique et unique, la spécificité de l'hôte, font des baculovirus une forme de lutte séduisante pour les agriculteurs et qui s'accorde bien avec les programmes de lutte intégrée, puisqu'elle serait sans effets non intentionnels.

LE DÉVELOPPEMENT DE LEUR UTILISATION se heurte à de nombreuses contraintes : spectre d'activité étroit, action lente, importance de la programmation du traitement, le fait que le virus doit être ingéré par les larves, la persistance limitée au champ (1 à 2 jours sur cotonnier, 4 à 7 jours sur les autres cultures) (sensibilité au rayonnement solaire et au pH élevé du feuillage), leur durée de vie limitée par rapport aux insecticides chimiques et les problèmes de production de masse (voir tableau 8, p. 376).

PERSPECTIVES : L'efficacité des baculovirus peut être optimisée par l'amélioration des souches existantes par les méthodes de recombinaison génétique. En effet, la plasticité du génome des baculovirus est très importante : deux souches peuvent échanger une partie de leur information génétique et les recombinants posséder alors des propriétés nouvelles (délai de mortalité plus rapides, temps plus rapide de cessation d'alimentation). Une autre perspective est leur manipulation génétique. Depuis quelques années, les connaissances sur leur génome se sont considérablement accrues et on sait les manipuler au laboratoire pour introduire dans leur génome, dans des régions bien précises, un gène étranger. Cette technique de génie génétique est en plein développement et permet *in vivo* et *in vitro* de produire un grand nombre de protéines étrangères à partir de baculovirus dont le gène de la polyédrine a été remplacé par un gène codant pour une protéine d'intérêt médical ou pharmaceutique.



## nématodes entomopathogènes

Bien que l'on connaisse de nombreux *Mermithidae*, *Tylenchidae*, *Aphelenchidae* et *Rhabditidae* comme étant d'importants antagonistes des insectes, très peu d'espèces de Nématodes ont été utilisés en lutte biologique. Seuls les *Rhabditidae* des genres *Steinernema* et *Heterorhabditis* et leurs symbiotes bactériens respectifs, *Xenorhabdus* et *Photorhabdus*, sont utilisés pour décimer des populations larvaires d'insectes.

Le cycle de développement du nématode comprend une phase libre et une phase de propagation. Le seul stade se déroulant à l'extérieur de l'insecte-hôte est le 3<sup>e</sup> stade (larves dauer L3). Elles portent leur symbiote dans le tube digestif et chez les *Steinernema* dans une vésicule particulière de l'intestin. Elles cherchent activement des insectes hôtes et pénètrent dans l'hémocèle où elles trouvent des conditions favorables de multiplication. Elles commencent à s'alimenter, libèrent les bactéries symbiotes dans l'hémolymphe et commencent leur cycle de développement. Lorsque le nématode pénètre dans l'hémocèle de l'insecte, il n'est pas reconnu par les hémocytes de la plupart des ordres d'insectes ; son tégument est souillé de microorganismes qui induisent la mise en jeu des défenses de l'insecte, ce qui permet à l'hémolymphe de retrouver sa stérilité. Le nématode et la bactérie vont alors provoquer une dépression générale de l'immunité. Les parasites secrètent des facteurs qui détruisent les peptides anti-bactériens (facteur immuno-dépresseur) auxquels leurs bactéries associées pourraient être sensibles. Ils libèrent ensuite leurs propres symbiotes qui se multiplient en provoquant une toxémie et une septicémie. En même temps, les bactéries excrètent des inhibiteurs du système phénol-oxydase qui vont abolir la phagocytose. Au terme de la septicémie et à la mort de l'insecte, l'envahissement de la cavité générale par la propre flore intestinale de l'insecte est difficile parce que l'espace a été colonisé par les symbiotes et que ces derniers ont produit des antibiotiques inhibant la plupart des compétiteurs possibles (molécules à large spectre, bactériocines à spectre étroit). Ces conditions assurent la multiplication du nématode dans la dépouille de l'insecte. C'est un microcosme quasiment monoxénique où les nématodes vont consommer essentiellement la biomasse bactérienne. Cette situation privilégie ainsi la transmission verticale des « bonnes » bactéries à la descendance, lorsque les larves L3 recrutent leurs symbiotes, avant de quitter le cadavre de l'insecte pour une prochaine infestation.

Le spectre d'hôtes des nématodes est large en laboratoire. Ainsi, les essais biologiques ont montré que *S. carpocapsae* est pathogène de 250 espèces d'insectes de 17 familles de 11 ordres. Toutefois, dans la nature, l'efficacité est plus limitée et dépend des conditions de rencontre entre les protagonistes.



Les nématodes peuvent être produits en masse *in vitro* dans des bio-réacteurs à grande échelle et conservés à basse température pendant plusieurs mois. Après introduction dans le sol, ils cherchent activement leur insecte hôte et le tuent en quelques jours. N'ayant pas d'interactions avec les produits phytosanitaires, ils peuvent être utilisés dans les programmes de lutte intégrée. Ils ont des caractéristiques biologiques et écologiques qui les rendent tout à fait inoffensifs vis-à-vis de l'environnement. Eux et leurs symbiotes associés sont sans danger pour les Vertébrés à sang chaud y compris pour les humains.

La technologie de production la plus utilisée actuellement est une multiplication des nématodes en culture monoxénique en phase solide à trois dimensions. Ce procédé, comme la production *in vivo*, pose un problème économique car il exige une importante main-d'œuvre. Des techniques plus avancées en culture liquide ont été développées pour produire *Steinernema carpocapsae* dans des bio-réacteurs à grande échelle et des recherches sont en cours pour améliorer la culture liquide d'*Heterorhabditis*. On arrive ainsi à réduire les coûts de plus de 10 fois : exemple, la production de 1 million de DJs d'*Heterorhabditis* sp. produites en cultures en milieu solide coûte environ 1 DM, la même quantité produite en bio-réacteurs en culture liquide coûterait moins du 1/10<sup>e</sup>. Cela dit, il faudrait un volume de ventes suffisamment important pour justifier le développement d'une production commerciale.

La conservation et le transport des nématodes entomopathogènes sont des contraintes importantes. Les larves dauer sont sensibles à la dessiccation, aux températures élevées et au manque d'oxygène. Cela doit être pris en considération pour leur développement et leur distribution et des méthodes d'amélioration de leur formulation doivent être trouvées.

Du fait des coûts élevés de production, les applications par lâchers inondatifs dans les pays industrialisés sont encore limités aux cultures à haute valeur ajoutée.

Pour obtenir un contrôle satisfaisant d'*Otiorhynchus sulcatus* en pépinières, il faut une densité de nématodes de  $5 \times 10^9$ /ha.

Le marché potentiel en 1994 (= total de ventes dans le monde) était supérieur à 10 millions de \$, il est aujourd'hui en très nette diminution (voir tableau 9, p. 380).

Deux stratégies se distinguent pour diminuer les contraintes d'utilisation des nématodes entomopathogènes. L'une d'elles consiste en l'étude comparée des différentes associations entre souches de nématodes et souches bactériennes symbiotiques. Pour ce faire, il convient d'analyser la diversité génétique des deux partenaires et de leurs associations à partir de prospections exhaustives dans des environnements très différenciés (régions chaudes sèches, tropicales,



Tableau 9 — Préparations commerciales à base de nématodes entomopathogènes

Nématode	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Heterorhabditis bacteriophora</i>	Heteromask	Biologic	<i>Otiorynchus sulcatus</i> , <i>O. salicola</i>
«	Cruiser	Ecogen	
«	Lawn Patrol	Hydro-Gardens	
«	Nema-top, Nema-green	e-nema	Insectes
<i>Heterorhabditis megidis</i>	<i>Heterorhabditis megidis</i>	Neudorff	<i>Otiorynchus</i>
«	Dickmaulrüssler Nematoden	Andermatt Biocontrol	<i>O. sulcatus</i> , <i>O. salicola</i>
«	Larvanem	Koppert	<i>Otiorynchus</i>
«	Nemasys H	Microbio et Biobest	<i>O. sulcatus</i>
<i>Phasmarhabditis hermaphrodita</i>	Nemaslug	MicroBio	Limaces
	Phasmarhabditis-system	Biobest	«
<i>Steinernema carpocapsae</i>	Biosafe WG	Thermo Trilogy	<i>O. sulcatus</i>
«	Exhibit SC-WDG	Novartis	Larves de Sciaridae
«	BioVector WG, Savior WG	Thermo Trilogy	
«	BioLogic, Ecomask	Biologic	
«	Guardian	Hydro-Gardens	
«	<i>Steinernema carpocapsae</i>	Neudorff	
<i>Steinernema feltiae</i>	Entonem, Sciarid	Koppert	
«	BotaniGard	Mycotech	
«	Scanmask	Biologic et IPM Laboratories	
«	Magnet	Thermo Trilogy	
«	Nema-plus	e-nema	
«	Exhibit SF-WDG	Syngenta Bioline	Sciaridae
«	Nemasys	Microbio et Biobest	Sciaridae, <i>Otiorynchus</i>
«	Nemasys-M	«	Diptères
«	<i>Steinernema feltiae</i>	Neudorff	Larves de Sciaridae
«	Traunem	Andermatt Biocontrol	Sciaridae
<i>Steinernema glaseri</i>	<i>Steinernema glaseri</i>	Praxis	Scarabaeidae
«	«	Thermo Trilogy	«
«	«	Greenfire	«
<i>Steinernema riobrave</i>	Biovector 355 WG		
	Devour WG, Vector MC, WG	Thermo Trilogy	<i>Scapteriscus</i> spp. et ravageurs Citrus
<i>Steinernema scapterisci</i>	Otinem S	Ecogen	<i>Scapteriscus vicinus</i> et <i>Gryllotalpa</i> spp.

déserts, littoral etc.). Complémentairement, il faudra procéder à de nouvelles associations entre nématodes et souches symbiotiques. La deuxième démarche consiste à modifier le génome des nématodes avec des bactéries par des voies conventionnelles ou par transgénése. La proximité phylogénétique entre *Heterorhabditis* et *Caenorhabditis* est à cet égard tout à fait intéressante.

Les méthodes de génétique classique et de génie génétique peuvent être utilisées pour l'amélioration génétique des nématodes entomopathogènes et de leurs symbiotes bactériens (en particulier amélioration de leur pathogénicité, du spectre d'hôtes, des tolérances environnementales et de la durée de conservation). Dans ce domaine, les nématodes ont un gros avantage : ayant une propagation hermaphrodite, ils sont des cibles idéales pour l'amélioration génétique ; ainsi, des résultats spectaculaires ont été obtenus avec *Caenorhabditis elegans*. De même, en ce qui concerne les symbiotes bactériens des nématodes, la relation phylogénétique étroite entre *Xenorhabdus* et *E. coli* a permis de cloner plusieurs gènes de *Xenorhabdus* chez *E. coli*.



## lutte par confusion sexuelle

Les premières phéromones ont été décrites il y a plus de trente ans. À la base de la communication olfactive entre insectes d'une même espèce, ces molécules sont rapidement devenues des outils dans la stratégie globale de lutte intégrée.

Le principe de la confusion consiste à perturber la rencontre entre le mâle et la femelle afin d'empêcher l'accouplement et donc la ponte et le développement néfaste des chenilles. Il suffit pour cela de diffuser dans la parcelle à protéger une quantité de phéromone synthétique telle que les mâles présents soient incapables de reconnaître à travers ce « bruit de fond » le message chimique émis par leurs propres femelles. Les mâles sont alors désorientés et la fréquence des accouplements se trouve fortement diminuée. Puisqu'on intervient avant l'accouplement, on peut parler de méthode de lutte « hyper-préventive » par comparaison avec les traitements chimiques dits « préventifs », qui, en raison de leur activité ovicide doivent être placés juste avant le dépôt des premiers œufs ou immédiatement après.

Cette technique de lutte s'est d'abord développée aux États-Unis où elle est mise en œuvre à grande échelle contre le principal ravageur des champs de coton, le Ver rose du cotonnier. Ce dernier ayant acquis des résistances à la majorité des insecticides chimiques, l'épandage massif de sa phéromone sexuelle, le gossypure, restait en effet le seul recours pour les agriculteurs américains. Depuis l'homologation de la première phéromone destinée à la confusion sexuelle (= la phéromone sexuelle du Ver rose du cotonnier, le gossypure, de la société américaine Albany International dont les États-Unis ont validé l'application aux champs de coton en 1978), la méthode s'est ainsi élargie progressivement à une quinzaine de Lépidoptères responsables de dégâts en arboriculture fruitière et vignes. En Europe, les expérimentations ont ainsi prouvé l'efficacité de la confusion sexuelle pour la lutte contre deux ennemis des vergers, la Tordeuse orientale du pêcher et le Carpocapse de la pomme et de la poire, et contre deux des principaux ravageurs des vignes, l'Eudémis et la Cochyliis.

En France, depuis 1989, une collaboration scientifique a été entreprise entre l'INRA de Bordeaux et la firme BASF, leader européen en matière de confusion sexuelle pour le développement du procédé contre les deux tordeuses de la vigne en Europe du Sud.

Pratiquement, avec 500 diffuseurs/ha (100 à 300 g de phéromone/ha) accrochés sur des fils de palissage juste avant le début du premier vol (fin mars-début avril) et produisant une diffusion de l'ordre de 50 mg/ha/h, la protection est assurée jusqu'à la date de la vendange. On peut contrôler le bon fonctionnement de



la méthode tout au long de la saison par le suivi de pièges sexuels classiques : l'absence de captures indique alors la désorientation des mâles et donc un succès apparent de la confusion qu'il convient encore de confirmer par des contrôles visuels à chaque génération.

Il a été démontré que l'efficacité du procédé se situait mieux ou au même niveau qu'une protection insecticide bien conduite. Par rapport à des zones non traitées, l'efficacité est de l'ordre de 93 à 96 %.

Actuellement, on cherche à obtenir un procédé tout aussi fiable pour la confusion sexuelle du carpocapse.

*La méthode* : Elle ne nécessite qu'un nombre limité de poses de diffuseurs (1 à 3) pendant la saison de reproduction du ravageur et permet de limiter le nombre de traitements chimiques.

Par ailleurs, très spécifique, la confusion sexuelle respecte l'entomofaune auxiliaire et n'affecte pas les insectes pollinisateurs ni les prédateurs naturels du ravageur.

Le maintien d'une atmosphère saturée en phéromone doit se prolonger pendant toute la période de reproduction du ravageur et rester à un niveau suffisamment élevé pour que le signal produit reste supérieur à celui de la femelle ; cela impose, d'une part que la phéromone reste stable, d'où la nécessité de lui adjoindre des agents protecteurs, mais aussi d'utiliser un diffuseur adapté : c'est une des difficultés majeures à surmonter pour que se généralise l'utilisation des phéromones ; une libération régulière de la phéromone requiert la mise au point de diffuseurs qui ne risquent ni d'altérer sa composition chimique, et par là même son efficacité attractive, ni de provoquer une évaporation trop rapide.

La confusion sexuelle implique un bouleversement important des pratiques et une formation spécifique des agriculteurs.

La fabrication de phéromones de synthèse n'est assurée que par un nombre extrêmement restreint de sociétés. La position numéro 1 revient au Japonais Shin-Etsu Chemical qui, avec une capacité de production d'environ 50 tonnes par an, représenterait à lui seul 90 % de la production.

Les phéromones subissent les mêmes règles d'homologation que les insecticides traditionnels et celles-ci ont tendance à être de plus en plus contraignantes dans de nombreux pays.

Quatre produits sont actuellement commercialisés en France : Rak5, Rak2, Rak1, Rak1+2 (voir tableau 10, p. 383 à 385).

Tableau 10 — Biopesticides commercialisés en France  
(d'après l'Index phytosanitaire de l'ACTA 2000)

Insecte	Nom commercial	Firme	Cible
<b>10.1. Insectes entomophages</b>			
<i>Anagrus atomus</i>	Ana-line a	Syngenta Bioline	<i>Hauptidia maroccana</i>
<i>Aphelinus abdominalis</i>	Aphelinus-system	Biobest	<i>Macrosiphum euphorbiae</i>
«	Aphel-line ab	Syngenta Bioline	«
«	Aphelinus abdominalis	GIE La Croix	«
«	Aphilin	Koppert	«
<i>Aphidius colemani</i>	Aphidius-system	Biobest	<i>Myzus persicae</i> , <i>Aphis gossypii</i>
«	Aphi-line c	Syngenta Bioline	«
«	Aphipar	Koppert	«
<i>Aphidius ervi</i>	Ervi-system	Biobest	<i>Macrosiphum euphorbiae</i> , <i>Myzus persicae</i> , <i>Aulacorthum</i>
«	Aphi-line e	Syngenta Bioline	«
«	Ervipar	Koppert	«
<i>Aphidoletes aphidimyza</i>	Aphidoletes-system	Biobest	Pucerons
«	Aphido-line	Syngenta Bioline	«
«	Aphidend	Koppert	«
<i>Chrysoperla carnea</i>	Chrysopa MC-500 system	Biobest	Pucerons
«	Chrysopa	Koppert	«
«	Chryso-line c	Syngenta Bioline	«
<i>Cryptolaemus montrouzieri</i>	Cryptolaemus-system	Biobest	<i>Planococcus</i> , <i>Pseudococcus</i>
«	Crypto-line m	Syngenta Bioline	«
«	Cryptobug	Koppert	«
<i>Dacnusa sibirica</i>	Dacnusa-system	Biobest	<i>Liriomyza</i> sp.
«	Dac-line s	Syngenta Bioline	(mouche mineuse)
«	Minusa	Koppert	«
<i>Delphastus pusillus</i>	Delphastus-system	Biobest	<i>Trialeurodes vaporariorum</i>
<i>Diglyphus isaea</i>	Diglyphus-system	Biobest	<i>Liriomyza</i> sp.
«	Dig-line i	Syngenta Bioline	«
«	Diglyphus isaea	GIE La Croix	«
«	Miglyphus	Koppert	«
<i>Diglyphus isaea</i> + <i>Dacnusa sibirica</i>	Dacnusa mix-system	Biobest	<i>Liriomyza</i> sp.
«	Minex	Koppert	«
<i>Encarsia formosa</i>	Encarsia-system	Biobest	<i>Trialeurodes vaporariorum</i>
«	Encar-line f	Syngenta Bioline	«
«	Encarsia	GIE La Croix	«
«	En-strip	Koppert	«
<i>Eretmocerus eremicus</i>	Eretmocerus-system	Biobest	<i>Trialeurodes vaporariorum</i>
«	Ercal	Koppert	«
«	Eret-line e	Syngenta Bioline	«
<i>Feltiella acarisuga</i>	Therodiplosis-system	Biobest	Acariens
«	Theroline p	Syngenta Bioline	«
<i>Harmonia axyridis</i>	Harmonia-system	Biobest	Pucerons
«	Harmonia	Biotop	«
«	Harmonia axyridis	Koppert	«
<i>Leptomastix dactylopii</i>	Leptomastix-system	Biobest	<i>Planococcus citri</i>
«	Lepto-line d	Syngenta Bioline	«
«	Leptopar	Koppert	«
<i>Macrolophus caliginosus</i>	Macrolophus-system	Biobest	Aleurodes
«	Macro-line C	Koppert	«
«	Mirical	Koppert	«
<i>Metaphycus bartletti</i>	Metaphycus	Koppert	<i>Saissetia oleae</i>
«	«	Biotop	«



Tableau 10 (suite) — Biopesticides commercialisés en France  
(d'après l'Index phytosanitaire de l'ACTA 2000)

Insecte	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Orius insidiosus, majusculus, laevigatus</i>	Orius-system	Biobest	Thrips ( <i>Frankliniella occidentalis</i> )
«	Ori-line	Syngenta Bioline	«
«	Thripor	Koppert	«
<i>Trichogramma evanescens</i>	Tricho-line e	Syngenta Bioline	<i>Mamestra brassicae</i> , <i>Chrysodeixis chalcites</i> , <i>Laconobea oleracea</i>
«	Tricho-strip	Koppert	«
<i>Trichogramma evanescens</i> + <i>T. brassicae</i>	Trichogramme-serre	Biotop	«
«	Trichogramma-mix-system	Biobest	«
<i>Trichogramma maidis</i>	Pyratyp	BASF France	<i>Ostrinia nubilalis</i>
«	TR16	UNCAA	«

## 10.2. Acariens entomophages et acarophages

<i>Amblyseius californicus</i>	Californicus-system	Biobest	Acariens phytophages
«	Ambly-line cal	Syngenta Bioline	«
«	Spical	Koppert	«
<i>Amblyseius cucumeris</i>	Amblyseius breeding system	Biobest	Thrips
«	Amblyseius-system	Biobest	«
«	Amblyseius-vermiculite-system	Biobest	«
«	Ambly-line cu, Ambly-line cu CRS	Syngenta Bioline	«
«	Thripex, Thripex plus	Koppert	«
<i>Amblyseius degenerans</i>	Degenerans-system	Biobest	Thrips
«	Ambly-line d	Syngenta Bioline	«
«	Thripans	Koppert	«
<i>Hypoaspis miles</i>	Hypoaspis-system	Biobest	Sciaridae
«	Hypo-line m	Syngenta Bioline	«
«	Entomite	Koppert	«
<i>Phytoseiulus persimilis</i>	Phytoseiulus-system, Phytoseiulus-T-system	Biobest	<i>Tetranychus urticae</i>
«	Phyto-line p	Syngenta Bioline	«
«	Spidex	Koppert	«

## 10.3. Virus entomopathogènes

Nom du virus	Nom commercial	Firme	Cible
Virus de la granulose du carpocapse	Carpovirusine	Calliope	Carpocapse des pommes et des poires
Virus de la polyédrose nucléaire de <i>Mamestra brassicae</i>	Mamestrin	Calliope/NPP	<i>Mamestra brassicae</i>

## 10.4 Nématodes

Nématode	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Heterorhabditis megidis</i>	Heterorhabditis-system	Biobest	<i>Otiorynchus sulcatus</i>
«	Larvanem	Koppert	«
<i>Phasmarhabditis hermaphrodita</i>	Phasmarhabditis-system	Biobest	Limaces
<i>Steinernema carpocapsae</i>	Exhibit SC-WDG	Syngenta Bioline	

Tableau 10 (suite) — Biopesticides commercialisés en France  
(d'après l'Index phytosanitaire de l'ACTA 2000)

10.5 Champignons entomopathogènes

Champignon	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Beauveria bassiana</i> 147	Ostrinil	Calliope/NPP	<i>Ostrinia nubilalis</i>
<i>Beauveria tenella</i> 96	Betel	Betel Réunion	<i>Hoplochelus marginalis</i>

10.6. Préparations commerciales à base de *Bacillus thuringiensis*

Variété <i>B. t.</i>	Nom commercial	Firme	Cible
kurstaki	Bactospéine XLV	Valent Biosciences	Larves de Lépidoptères
	Bactospéine PM 160005	«	«
	Dipel ES, Dipel 8 AF, Dipel 8L	«	«
	Foray 48B	«	«
	Dipel 2X	Valent Biosciences/Plantin	«
	Ecotech pro	Aventis	«
	Scutello, Scutello 2x	Biobest	«
	Bactifog	Dreyfus-Herschtel	«
	Bacivers	Goëmar	«
	Batik, Batik UBV	Calliope/NPP	«
	Biobit 2x	BASF France	«
	Biocillis	AgriSense	«
	Delfin	AgriSense/Loiret & Haëntjens	«
	Bactura	Koppert	«
	Dipel poudre mouillable	Plantin	«
	Insectobiol L, insectobiol M	Samabiol	«
tenebrionis	Novodor FC	Valent Biosciences/Koppert	Coléoptères ( <i>Leptinotarsa decemlineata</i> )

10.7. Préparations commerciales à base de champignons utilisés contre les phytopathogènes

Champignon	Nom commercial	Firme	Cible
<i>Endothia parasitica</i>	Endothia parasitica	CNICM	<i>Endothia parasitica</i> (chancre du châtaignier)

10.8. Médiateurs chimiques (lutte par confusion sexuelle)

Nom du produit	Nom commercial	Firme	Cible
Acétate de 8-dodécényle	Rak 5	Compo Horticulture	Tordeuse orientale (abricotier, pêcher)
E7-Z9-Dodécadiénylacétate	Rak 2 - Eudémis 3 générations	BASF France	Eudémis de la vigne
Z9-Dodécénylacétate	Rak 1 - Cochyliis	BASF France	Cochyliis de la vigne
Z9-Dodécénylacétate + E7-Z9-Dodécadiénylacétate 2 générations	Rak 1+2	BASF France	Tordeuses de la vigne



## le marché des biopesticides

Toutes ces dernières années, les biopesticides ont été l'objet d'un important effort de recherche et de développement des produits (augmentation de 25 % par an entre 1982 et 1992). L'intérêt pour les biopesticides a augmenté en réponse au problème de l'impact des pesticides chimiques à large spectre sur l'environnement et la santé et l'apparition d'une résistance aux pesticides chimiques. Les biopesticides sont maintenant considérés comme une composante des systèmes de lutte intégrée, dans lesquels ils constituent une des méthodes de lutte que les agriculteurs peuvent utiliser pour lutter durablement contre les ennemis des cultures, de manière économique et inoffensive pour l'environnement.

LE MARCHÉ GLOBAL DES BIOPESTICIDES était de 200 millions de \$ en 1995 (pour l'Europe, 102 millions de \$ en 1996), dont plus de 90 % pour la lutte contre les insectes ; les insecticides microbiens dominent avec *Bacillus thuringiensis* qui occupe 92 % de ce marché (100 millions de \$) ; le marché des entomophages représente 40 millions de \$.

Ce marché des biopesticides représente donc 0,7 % du marché phytosanitaire.

Pour mémoire, le marché mondial phytosanitaire dépasse actuellement les 30 milliards de \$ (dont 14,1 pour les herbicides, 8,9 pour les insecticides, 5,9 pour les fongicides) (source IBC, 1997). Les préoccupations environnementales font que la croissance de ce secteur se ralentit en Europe mais continue à augmenter aux États-Unis.

Du point de vue des ventes dans l'Union Européenne, les États-Unis totalisent 40 % des ventes et l'Est de l'Asie 20 %. Le Benelux est le leader en Europe de l'utilisation de la lutte biologique (en raison de l'utilisation intensive de prédateurs et phéromones pour la production de légumes, bulbes et fleurs de grande qualité) ; ensuite, vient l'Italie qui a des systèmes de lutte intégrée très bien développés.

**COÛT DU DÉVELOPPEMENT D'UN BIOPESTICIDE :** Il est difficile de donner un chiffre général pour un biopesticide ; cela varie entre 1 et 10 millions de \$ pour le coût total de développement (dont 2 pour l'homologation de ceux qui doivent passer par cette procédure) et cela prend de trois à cinq ans. Pour mémoire, le développement et l'homologation d'un pesticide chimique prennent de huit à dix ans et peuvent coûter jusqu'à 80 millions de \$ dont 20 pour l'homologation. Donc, non seulement le coût des biopesticides est moindre mais leur délai de commercialisation est plus court que celui des pesticides chimiques.



**COÛT DES TRAITEMENTS :** Les coûts des traitements avec des biopesticides ont tendance à chuter. Nous en donnerons ici quelques exemples.

Le coût de l'utilisation de *Bacillus thuringiensis* contre le doryphore *Leptinotarsa decemlineata* aux États-Unis est passé de 20 \$/acre (1 acre = environ 0,4 ha) à 10 depuis 1990.

Le coût de la lutte biologique contre les larves de Ver blanc<sup>\*</sup> de la canne à sucre avec le betel (mycoinsecticide à base de *Beauveria brongniartii* souche 96) est de 1 200 FF/ha et c'est un traitement unique, alors qu'un traitement chimique classique revient à 2 000 F et doit être renouvelé tous les trois ans.

En 1993, le prix de revient de traitement contre la Pyrale du maïs avec des trichogrammes était de 260 à 310 F/ha (avec deux passages manuels) contre 250 à 320 F pour un traitement chimique. Selon l'Union InVivo (ex-UNCAA), 50 kg de ce produit biologique permet de traiter une surface grande comme Paris (9 000 ha) quand 120 kg de pyréthriinoïdes ou 300 à 500 kg d'organophosphorés seraient nécessaires.

**PROBLÈMES LIÉS À LA COMMERCIALISATION :** Les principales questions que se posent les firmes avant de décider d'investir dans un biopesticide sont les suivantes : ce produit correspond-il à un besoin sur le marché ? Le produit est-il efficace et inoffensif ? le produit sera-t-il rentable ? Quels seront les coûts de développement et la taille du marché potentiel ?

**LES PRINCIPALES FIRMES :** Syngenta domine actuellement le marché des biopesticides avec 18,4 % du marché ; viennent ensuite Koppert (Pays-Bas) avec 18,2 % et Valent Biosciences Laboratories avec 12,5 % ; ces trois firmes à elles seules représentent 49,1% du marché européen.

Le secteur bioinsecticide est dominé par Syngenta, Valent Bioscience et Aventis qui totalisent 86 % du marché européen des bioinsecticides. Pour les autres secteurs des biopesticides, Valent Bioscience domine avec 33 %, puis Intrachem (25 %) et NPP (25 %) ; pour les phéromones, une seule grande firme actuellement, BASF, et beaucoup de petites firmes (AgriSense, Thermo Trilogy et Russell). Il y a actuellement environ 30 firmes commerciales dans ce secteur contre plus de 60 en 1989. Il leur est prédit une bonne croissance donc on peut s'attendre à une compétition grandissante. En même temps, elles ont tendance actuellement à concentrer leurs ressources pour devenir justement plus compétitives et améliorer leurs coûts.

Les firmes analysent actuellement de près leur portefeuille pour mieux évaluer les conditions du marché. Certaines se déclarent ouvertement peu impliquées dans les activités de lutte biologique. D'autres développent un fort investissement dans les plantes transgéniques ou les organismes génétiquement modifiés (ex. baculovirus).



## la réglementation

### RÈGLES D'HOMOLOGATION

Pour les préparations de microorganismes ou de virus : la réglementation européenne qui figure en annexe III de la directive 91/414/CEE est appliquée. En revanche, les macroorganismes (ex. les entomophages) ne sont pas soumis aux règles de l'homologation. La mise en œuvre de cette procédure implique au préalable le choix par l'industriel d'un pays rapporteur. Ce dernier évaluera tout d'abord la recevabilité du dossier et soumettra ses conclusions au Comité européen. Après acceptation, l'état rapporteur évaluera le contenu du dossier et proposera un classement toxicologique et écotoxicologique et le cas échéant des recommandations d'usage. À nouveau, le comité européen statuera sur ces propositions et demandera au pétitionnaire de prendre en considération l'ensemble des compléments d'étude et de remarques sollicitées. Au terme de cette procédure, la substance active, en l'occurrence la souche de microorganisme auxiliaire est inscrite sur la « liste positive » qui vaut pour toute la communauté. Chaque état membre ne se prononce par la suite que sur l'usage des produits formulés.

### RÈGLES CONCERNANT L'IMPORTATION D'AGENTS DE LUTTE BIOLOGIQUE

Avec l'intérêt croissant pour les agents de lutte biologique non indigènes, la nécessité est apparue de règles et de procédures pour l'introduction de ces agents. Il y a eu un certain nombre d'initiatives nationales dans ce domaine en particulier de la part de pays qui ont une longue expérience dans le domaine de la lutte biologique classique (Canada, États-Unis, Australie, Afrique du Sud, Brésil, Nouvelle-Zélande) et des initiatives régionales (Europe, Amérique du Sud). Une étape importante de l'établissement de normes internationales a été franchie en 1995 avec la ratification par le Conseil de la FAO d'un code de conduite pour l'importation et le lâcher d'agents de lutte biologique exotiques. Ce code est destiné essentiellement aux pays où il n'y a pas de législation nationale dans ce domaine. En ce qui concerne la France, le principe fondamental de la souveraineté des états veut qu'elle fixe sa politique nationale en matière de protection des végétaux et notamment en matière d'importation et d'utilisation d'agents de lutte biologique. Cette politique est cependant orientée par un certain nombre de références internationales contractuelles (accords, conventions) signées par la France, y compris les dispositions européennes (directives, règlements) :

- Accord SPS et Convention de Rome, faisant partie des accords de Marrakech (avril 1994) ;
- Convention internationale pour la protection des végétaux, signée à Rome le 6/12/1951 et modifiée le 21/11/1979 ;
- Code de conduite pour l'importation et la dissémination des agents de lutte biologique (FAO).

En France, l'INRA dispose d'une quarantaine à Valbonne, près d'Antibes (« une quarantaine pour agents de lutte biologique est une structure officielle de confinement de ces agents soumis à la réglementation phytosanitaire en vue de leur étude, de recherches ou d'examen complémentaire et/ou de tests », code de conduite FAO) dans le cadre de l'Unité de transfert en lutte biologique (= structure d'échange permanent recherche-industrie-profession agricole). Cette quarantaine consiste en un ensemble, isolé du reste des bâtiments, équipé pour assurer le tri, la détermination et la mise en souche des auxiliaires (parasitoïdes et prédateurs) sur hôte naturel ou de substitution, ainsi qu'un ensemble équipé pour assurer la production des entomophages en quantité suffisante pour permettre leur utilisation expérimentale et pour résoudre les problèmes de production.

## CONCLUSION

L'inventaire des biopesticides commercialisés montre que les succès obtenus avec les différents types d'organismes restent limités et spécifiques. La faible part de marché qu'ils représentent par rapport au marché phytosanitaire mondial s'explique en partie par la spécificité de ces produits qui est à la fois leur plus grand avantage et leur plus grande contrainte. Malgré un incontestable intérêt pour les biopesticides, les firmes phytosanitaires réduisent leurs investissements au profit du développement des plantes transgéniques d'une part, et de méthodes raisonnées de lutte chimique d'autre part ; parmi celles-ci, de bons espoirs sont fondés sur les nouveaux insecticides chimiques de type régulateurs de croissance des insectes qui s'avèrent efficaces à faibles doses et avec peu d'applications.



Répertoire des firmes citées

Pays	Firme et site web	Pays	Firme et site web
États-Unis	ABBOTT Laboratories Chemical & Agricultural Products Division, <a href="http://www.abbott.com">http://www.abbott.com</a>	États-Unis	Biofac Inc. <a href="http://www.biofac.com">http://www.biofac.com</a>
États-Unis	AgBioChem Inc.	Suède	Bio-Innovation EFTR AB (BINAB) <a href="http://www.algonet.se/~binab/">http://www.algonet.se/~binab/</a>
Colombie	Ago Biocontrol	États-Unis	BioLogic
États-Unis	AgraQuest Inc. <a href="http://www.agraquest.com">http://www.agraquest.com</a>	Afrique du Sud	Biological Control Products
Pays-Bas	Agrichem BV	Royaume-Uni	Biological Crop Protection <a href="http://www.ukexnet.co.uk/hort/cha/bcp.htm">http://www.ukexnet.co.uk/hort/cha/bcp.htm</a>
Royaume-Uni	AgriSense-BCS Ltd <a href="http://www.agrisense.demon.co.uk">http://www.agrisense.demon.co.uk</a>	Australie	Biological Services
États-Unis	American Cyanamid Co. Agricultural Research Division <a href="http://www.cyanamid.com">http://www.cyanamid.com</a>		Biotop : Voir Union InVivo (ex-UNCAA)
Suisse	Andermatt Biocontrol AG <a href="http://www.biocontrol.ch/">http://www.biocontrol.ch/</a>	Hongrie	Bioved Ltd
Canada	Applied Bio-Nomics Ltd <a href="http://www.anbp.org/appliedbionomics.htm">http://www.anbp.org/appliedbionomics.htm</a>	États-Unis	Bioworks Inc. <a href="http://www.bioworksbiocontrol.com">http://www.bioworksbiocontrol.com</a>
Thaïlande	Applied Chemicals	Danemark	Borregard & Reitzel
États-Unis	Arbico Inc. <a href="http://www.arbico.com">http://www.arbico.com</a>		Brinkman : Voir Royal Brinkman BV
Allemagne	Aventis CropScience <a href="http://www.aventis.com">http://www.aventis.com</a>	Australie	Bugs for Bugs <a href="http://www.bugsforbugs.com.au">http://www.bugsforbugs.com.au</a>
Allemagne	BASF AG <a href="http://www.basf.com">http://www.basf.com</a>	Italie	Caffaro
France	BASF France SAS <a href="http://www.basf.fr">http://www.basf.fr</a>	France	Calliope S.A.
États-Unis	Beker Microbial Products Inc.	États-Unis	Caltec Agri Marketing Services
États-Unis	Beneficial Insect Company (The) <a href="http://www.thebeneficialinsects.com">http://www.thebeneficialinsects.com</a>	Espagne	Cequisa Muntaner
États-Unis	Beneficial Insectary <a href="http://www.insectary.com">http://www.insectary.com</a>	France	CNICM Comité national interprofessionnel de la châtaigne et du marron
France	Betel-Réunion	Nouvelle-Zélande	Coated Seed Ltd.
Belgique	Biobest Ilse Velden <a href="http://www.biobest.be">http://www.biobest.be</a>	France	Dreyfus-Herschtel
Australie	Bio-Care technology Pty. Ltd.	États-Unis	Ecogen Inc
France	Compo Horticulture	États-Unis	EcoSoil Systems <a href="http://www.ecosoil.com">http://www.ecosoil.com</a>
		Japon	Eikou Kasei Co., Ltd.
		Allemagne	e-nema GmbH <a href="http://www.e-nema.de">http://www.e-nema.de</a>
		Royaume-Uni	English Woodlands Biocontrol

Répertoire des firmes citées (suite)

Pays	Firme et site web	Pays	Firme et site web
États-Unis	FMC Corporation <a href="http://www.fmc.com">http://www.fmc.com</a>	États-Unis	Kunafin <a href="http://www.kunafin.com">http://www.kunafin.com</a>
Taiwan	Forward International Ltd.	Thaïlande	Ladda Co Ltd. GPO
République tchèque	Fytovita	États-Unis	M & R Durango Inc.
France	GIE Lacroix	Israël	Makhteshim Chemical Works Ltd. <a href="http://www.makhteshim.co.il">http://www.makhteshim.co.il</a>
France	Goëmar <a href="http://www.goëmar.com">http://www.goëmar.com</a>	Japon	Meiji Seika Kaisha Ltd <a href="http://www.meiji.co.jp">http://www.meiji.co.jp</a>
Pays-Bas	Gist-Brocades B.V. <a href="http://www.gist-brocades.nl">http://www.gist-brocades.nl</a>	Royaume-Uni	MicroBio Ltd. <a href="http://www.microbiogroup.com">http://www.microbiogroup.com</a>
États-Unis	Greenfire Inc. <a href="http://www.greenfire.net">http://www.greenfire.net</a>	États-Unis	Mycogen Crop Protection <a href="http://www.mycogen.com">http://www.mycogen.com</a>
Belgique	Grondortsmettingen De Custer n.v.	Israël	Mycontrol Ltd.
États-Unis	Gustafson Inc. <a href="http://www.gustafson.com">http://www.gustafson.com</a>	États-Unis	Mycotech Corp. <a href="http://www.mycotech.com">http://www.mycotech.com</a>
États-Unis	Helena Chemical Co <a href="http://www.helenachemical.com">http://www.helenachemical.com</a>	Canada	Nature's Alternative Insectary Ltd <a href="http://www.anbpb-NAI.htm">http://www.anbpb-NAI.htm</a>
Japon	Hokko Chemical Industry Co. Ltd. <a href="http://www.hokkochem.co.jp">http://www.hokkochem.co.jp</a>		Neudorff : Voir W. Neudorff
Chine	Hubei Sanonda Co. Ltd. <a href="http://www.sanonda.com">http://www.sanonda.com</a>	Japon	Nihon Nohyaku Co. Ltd. <a href="http://www.nichino.co.jp">http://www.nichino.co.jp</a>
États-Unis	Hydro-Gardens <a href="http://www.hydro-gardens.com">http://www.hydro-gardens.com</a>	Japon	Nissan Chemical Industries Ltd <a href="http://www.nissanchem.co.jp">http://www.nissanchem.co.jp</a>
Suisse	Intrachem (International) S.A.	France	NPP
États-Unis	IPM Laboratories Inc. <a href="http://www.ipmlabs.com">http://www.ipmlabs.com</a>	États-Unis	Plant Health Technologies <a href="http://www.simplot.com">http://www.simplot.com</a>
Japon	Japan Tobacco Inc.	États-Unis	Praxis
Japon	Kaken Pharmaceutical Co. Ltd. <a href="http://www.nni.nikkei-co.jp">http://www.nni.nikkei-co.jp</a>	Allemagne	Prophyta Biologischer Pflanzenschutz GmbH <a href="http://www.prophyta.com">http://www.prophyta.com</a>
Finlande	Kemira Agro Oy <a href="http://www.kemira-agro.com">http://www.kemira-agro.com</a>	États-Unis	Rincon-Vitova Insectaries Inc. <a href="http://www.rinconvitova.com">http://www.rinconvitova.com</a>
Allemagne	KFZB Biotechnik GmbH	Pays-Bas	Royal Brinkman BV <a href="http://www.brinkman.com">http://www.brinkman.com</a>
Pays-Bas	Koppert BV <a href="http://www.koppert.nl">http://www.koppert.nl</a>	France	Samabiol <a href="http://www.perso.wanadoo.fr/samabiol/sama.htm">http://www.perso.wanadoo.fr/samabiol/sama.htm</a>
Japon	Kubota Corp. <a href="http://www.kubota.co.jp">http://www.kubota.co.jp</a>	Canada	Sanex Inc.
Japon	Kumiai Chemical Industry Co., Ltd.		



**Répertoire des firmes citées (suite)**

Pays	Firme et site web	Pays	Firme et site web
Japon	Sankyo Co. Ltd <a href="http://www.sankyo.co.jp">http://www.sankyo.co.jp</a> Sanonda : Voir Hubei Sanonda	Suisse	Syngenta Agro SAS <a href="http://www.syngenta.com">http://www.syngenta.com</a>
Allemagne	Sauter & Stepper GmbH	Japon	Takeda Chemical Industries Ltd
Italie	SIAPA	Italie	Tecomag Srl <a href="http://www.tecomag.com">http://www.tecomag.com</a>
États-Unis	Soil Technologies Corp. <a href="http://www.soiltechcorp.com">http://www.soiltechcorp.com</a>	États-Unis	Thermo Trilogy Corp.
États-Unis	Stine Microbial Products and Stine Seed	États-Unis	Troy Biosciences Inc. <a href="http://www.troybiosciences.com">http://www.troybiosciences.com</a>
Suède	Svenska predator AB <a href="http://www.predator.se">http://www.predator.se</a>	Inde	Tuticorin Alkali Chemicals & Fertilizers Limited <a href="http://www.ferst-nic.in/vsfert/tac.htm">http://www.ferst-nic.in/vsfert/tac.htm</a>
États-Unis	Sylvan Spawn Laboratory <a href="http://www.sylvaninc.com">http://www.sylvaninc.com</a>	France	Union InVivo (ex-UNCAA) <a href="http://www.invivo-group.com">http://www.invivo-group.com</a>
Royaume-Uni	Syngenta Bioline	France	Valent Biosciences Corporation

## bibliographie

- ACTA – Index phytosanitaire. ACTA 2000, Paris, 644 p.
- ALABOUVETTE C., LEMANCEAU P., STEINBERG C. 1993 – Recent advances in the biological control of Fusarium wilts. Pestic. Sci. 37, 365-373.
- ALABOUVETTE C., HOEPER H., LEMANCEAU P., STEINBERG C. 1996 – Soil suppressive-ness to diseases induced by soilborne plant pathogens. In : Soil biochemistry, vol. 9, edited by G. STOTZKY and J.M. BOLLAG, Marcel Dekker, Inc., New York, 371-413.
- ALABOUVETTE C., SCHIPPERS B., LEMANCEAU P., BAKKER P.A. 1998 – Biological control of Fusarium wilts. Toward development of commercial products. In : Plant-microbe inter-actions and biological control. BOLAND G.J. and KUYKENDALL L.D. eds., Marcel Dekker, Inc., New York, 15-36.
- ALDRICH J.R. 1995 – Testing the « new associations » biological control concept with a Tachinid parasitoid (*Euclytia flava*). J. chem. Ecol. 21 (7), 1031-1042.
- ANDOW D.A., RAGSDALE D.W., NYVALL R.F. eds. 1997 – Ecological interactions and biological control. Westview press, Boulder, 334 p.
- ANDOW D.A., RAGSDALE D.W., NYVALL R.F. eds. 1997 – Biological control in cool temperate regions. In : Ecological interactions and biological control. Westview press, Boulder, 1-28.
- ARONSON A.I. 1994 – *Bacillus thuringiensis* and its use as a biological insecticide. Plant Breeding Rev. 12, 19-45.
- AULD B.A., MORIN L. 1995 – Constraints in the development of bioherbicides. Weed Technol. 9, 638-652.
- de BARJAC H., FRACHON 1990 – Classification of *Bacillus thuringiensis* strains. Entomophaga, 35, 2, 233-240.
- BEDDING R.A. 1998 – Future possibilities for using entomopathogenic nematodes. Jap. J. Nematol. 28, sp. Issue, 46-60.
- BELLOWS T.S., FISHER T.W. eds. 1999 – Handbook of biological control. Academic Press, 928 p.
- BENITEZ T., DELGADO-JARANA J., RINCON A., REY M., LIMON M.C. 1998 – Biofungicides : *Trichoderma* as biocontrol agent against phytopathogenic fungi. Recent Dev. Microbiol. 2(1), 129-150.
- BERTHIER A.L. 1996 – Les phéromones aux champs. Biofutur, 154, 15-20.



BOEMARE N., LAUMOND C., MAULEON H. 1996 – The entomopathogenic nematode-bacterium complex : biology, life cycle and vertebrate safety. Biocontrol Sci. Technol. 6, 3, 333-345.

BONNING B.C., HAMMOCK B.D. 1996 – Development of recombinant Baculoviruses for insect control. Annu. Rev. Entomol. 41, 191-210.

BURGES H.D. ed. 1998 – Formulations of microbial pesticides : beneficial microorganisms, nematodes and seed treatments. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 496 p.

BURKI H.M., SCHROEDER D., LAWRIE J., CAGAN L., VRABLOVA M., ELAYDAM M., SZENTKIRALYI F., GHORBANI R., JUTTERSONKE B., AMMON H.U. 1997 – Biological control of pigweeds (*Amaranthus retroflexus* L., *A. powellii* S. Watson and *A. bouchonii* Thell.) with phytophagous insects, fungal pathogens and crop management. Integrated Pest Manage. Rev. 2, 51-59.

CANNON R.J.C. 1995 – *Bacillus thuringiensis* in pest control. In : HOKKANEN H.M.T., LYNCH J.M. eds. – Biological control : benefits and risks. Cambridge University Press, Cambridge, 190-200.

CARRUTHERS, SMITS N. 1994 – Computer modelling of insect fungal pathogens : a functional approach to epizootiological modelling and more ! VI<sup>th</sup> International Colloquium on Invertebrate Pathology and Microbial Control, 316-324.

CHARNLEY A.K. 1997 – Entomopathogenic fungi and their role in pest control. In : The Mycota IV. Environmental and microbial relationships. Wicklow/Söderström Eds., Springer Verlag, Berlin, 185-201.

CHAUFAUX J. 1995 – Utilisation de biopesticides contre les ravageurs des cultures. Le point sur *Bacillus thuringiensis*. Insectes, 97, 2-6.

CIRAD 1997 – Weeds and weed control. Agric. Dév., n° sp., 68 p.

COPPING L.G. 1998 – The pesticide manual, 1<sup>st</sup> edition, British Crop Protection Council (BCPC), Farnham, UK, 333 p.

COUTEAUDIER Y., VIAUD M., RIBA G. 1996 – Genetic nature, stability, and improved virulence of hybrids from protoplast fusion in *Beauveria*. Microb. Ecol. 32, 1-10.

CROOK N.E., WINSTANLEY D. 1995 – Benefits and risks of using genetically engineered baculoviruses as insecticides. In : HOKKANEN H.M.T., LYNCH J.M. eds. – Biological control : benefits and risks. Cambridge University Press, Cambridge, 223-230.

CUNNINGHAM J.C. 1995 – Baculoviruses as microbial insecticides. In : REUVENI R. ed. Novel approaches to integrated pest management. Lewis Publishers, Boca Raton, 261-292.

DAVET P. 1996 – Vie microbienne du sol et production végétale. INRA Ed., Paris, 370 p.

DE BARJAC H., FRACHON E. 1990 – Classification of *Bacillus thuringiensis* strains. *Entomophaga*, 35, 2, 233-240.

DEFAGO G., KEEL C. 1995 – Pseudomonads as biocontrol agents of diseases caused by soil-borne pathogens. In : Hokkanen H.M.T., Lynch J.M. eds. Biological control : benefits and risks. Cambridge University Press, Cambridge, 137-148.

DEVAUCHELLE G. 1993 – Les baculovirus recombinants, bio-insecticides de demain. In : La lutte biologique. Dossier de la Cellule Environnement de l'INRA, 5, 93-96.

EHLERS R.U., PETERS A. 1995 – Entomopathogenic nematodes in biological control : feasibility, perspectives and possible risks. In : Hokkanen H.M.T., Lynch J.M. eds. 1995 – Biological control : benefits and risks. Cambridge University Press, Cambridge, 119-136.

EHLERS R.U., HOKKANEN H. (organized by) 1996 – Workshop on the introduction of non-endemic nematodes for biological control : scientific and regulatory policy issues, Malente, Germany, 8-11 June 1995. *Biocontrol Sci. Technol.* n° sp., 6, 291-293.

EVANS H.C. 1995 – Fungi as biocontrol agents of weeds : a tropical perspective. *Can. J. Bot.* (suppl. 1), 558-564.

EVANS H.F. ed. 1997 – Microbial insecticides : novelty or necessity ? Proceedings of a Symposium held at the University of Warwick, Coventry, 16-18 April 1997. British Crop Protection Council, Farnham, 302 p. (BCPC Symposium Proceedings n° 68).

FERRON P., FARGUES J., RIBA G. 1993 – Les champignons, agents de lutte microbiologique contre les ravageurs. In : La lutte biologique. Dossier de la Cellule Environnement de l'INRA, 5, 65-92.

FOKKEMA N.J. 1995 – Biological control of foliar fungal diseases. In : Hokkanen H.M.T., Lynch J.M. eds. Biological control : benefits and risks. Cambridge University Press, Cambridge, 167-176.

FOKKEMA N.J. 1996 – Biological control of fungal plant diseases. *Entomophaga*, 41, 3/4, 333-342.

FRANTZEN J., HATCHER P.E. 1997 – A fresh view on the control of annual plant *Senecio vulgaris*. *Integrated Pest Manage. Rev.*, 2, 77-85.

FRAVAL A. (Ed.) 1993 – La lutte biologique. Dossier de la Cellule Environnement de l'INRA, 5, 238 p.



- GASSMANN A. 1995 – Europe as a source of biological control agents of exotic invasive weeds : status and implications. Mitt. Schweiz. Entomol. Ges. / Bull. Soc. entomol. Suisse, 68, 313-322.
- GEORGIS R. 1997 – Commercial prospects of microbial insecticides in agriculture. In : Microbial insecticides : novelty or necessity ? Proceedings of a Symposium held at the University of Warwick, Coventry, 16-18 April 1997. British Crop Protection Council, Farnham, (BCPC Symposium Proceedings n° 68), 243-252.
- GREATHEAD D.J. 1995 – Benefits and risks of classical biological control. In : Hokkanen H.M.T., Lynch J.M. eds. 1995 – Biological control : benefits and risks. Cambridge University Press, Cambridge, 53-63.
- GREATHEAD D.J. 1997 – An introduction to the FAO code of conduct for the import and release of exotic biological control agents. Biocontrol News Inf., 18, 4, 117N-118N.
- GREENBERG S.M., NORDLUND D.A., KING E.G. 1996 – Mass production of *Trichogramma* spp. : experiences in the former Soviet Union, China, the United States and western Europe. Biocontrol News Inf., 17 (3), 51N-60N.
- GRESSEL J., AMSELLEM Z., WARSHAWSKY A., KAMPEL V., MICHAELI D. 1996 – Biocontrol of weeds : overcoming evolution for efficacy. J. Environ. Sci. Health B, 31 (3), 399-405.
- GROVES R.H. (convened by) 1997 – Recent incursions of weeds to Australia 1971-1995. CRC Weed Management Systems, technical Series n° 3, 68 p.
- GUILLON P. 1997 – Production of biopesticides : scale up and quality assurance. In : Microbial insecticides : novelty or necessity ? Proceedings of a Symposium held at the University of Warwick, Coventry, 16-18 April 1997. British Crop Protection Council, Farnham, (BCPC Symposium Proceedings n° 68), 151-162.
- HALL F.R., MEN J.J. eds. 1999. Methods in Biotechnology, vol. 5 : Biopesticides, use and delivery. Humana Press, Totowa, USA, 626 p.
- HAWLITZKY N. 1993 – La lutte biologique à l'aide de Trichogrammes. In : La lutte biologique. Dossier de la Cellule Environnement de l'INRA, 5, 143-160.
- HOKKANEN H.M.T., PIMENTEL D. 1989 – New associations in biological control : theory and practice. Can. Entomol. 121, 829-840.
- HOKKANEN H.M.T., LYNCH J.M. eds. 1995 – Biological control : benefits and risks. Cambridge University Press, Cambridge, 304 p.
- HOMINICK W.M., COLLINS S.A. 1997 – Application of ecological information for practical use of insect pathogenic nematodes. In : Microbial insecticides : novelty or necessity ? Proceedings of a Symposium held at the University of Warwick, Coventry, 16-18 April 1997. British Crop Protection Council, Farnham, (BCPC Symposium Proceedings n° 68), 73-82.



HUBER J. 1995 – Opportunities with Baculoviruses. In : HOKKANEN H.M.T., LYNCH J.M. eds. – Biological control : benefits and risks. Cambridge University Press, Cambridge, 201-206.

HURLE K. 1997 – Concepts in weed control. How does biocontrol fit in ? Integrated Pest Manage. Rev. 2, 87-89.

IBC (International Business Communications) 1997– Biopesticides and transgenic plants. New technologies to improve efficacy, safety and profitability. Washington, January 27-28, 1997.

INRA, DIC (Direction de l'Information et de la Communication) 1995 – Lutte contre les insectes ravageurs des cultures : les apports de la biologie. INRA, Paris, 42 p.

IOBC/OILB (International Organization for Biological Control/Organisation Internationale de Lutte Biologique) 1996 – International Conference : « Technology transfer in biological control : from research to practice / Conférence internationale Transferts de technologie en lutte biologique : de la recherche à la pratique », Montpellier, France, September 9-11, 1996. Bull. OILB/SROP 19 (8), 327 p.

IOBC/OILB. 1999. Evaluation des effets écologiques indirects de la lutte biologique / Evaluating indirect ecological effects of biological control. Symposium international de l'OILB Mondiale, Montpellier, France, 17-20 octobre 1999. Volume d'abstracts. Bull. OILB/SROP 22(2), 79 p.

JACKSON M.A. 1997 – Optimizing nutritional conditions for the liquid culture production of effective fungal biological control agents. J. Ind. Microbiol. Biotechnol. 19, 180-187.

JARONSKI S.T. 1997 – New paradigms in formulating mycoinsecticides. In : Pesticide formulations and applications systems, 17th volume, ASTM STP 1328, G.R. Goss, M.J. Hopkinson and H.M. Collins Eds., American Society for testing and materials.

JENSEN D.F., WOLFFHECHEL H. 1995 – The use of fungi, particularly *Trichoderma* spp. and *Gliocladium* spp., to control root rot and damping-off diseases. In : Hokkanen H.M.T., Lynch J.M. eds. Biological control : benefits and risks. Cambridge University Press, Cambridge, 177-189.

JUAREZ-PEREZ V.M. 1998 – Caractérisation de nouveaux gènes d'endotoxines de *Bacillus thuringiensis* Berliner. Thèse de doctorat ENSA.M, 28 janvier 1998, 2 volumes, vol. 1 : 155 p., vol. 2 : non paginé.

KERRY B.R. 1998 – Progress towards biological control strategies for plant-parasitic nematodes. In : Brighton Crop Protection Conference : Pests & Diseases – 1998 : volume 3 : Proceedings of an International Conference, Brighton, UK, 16-19 November 1998. British Crop Protection Council, Farnham, UK, 739-746.

KLINGAUF F.A.J. 1995 – Registration requirements of biological control agents in Germany and in the European Union. In : Hokkanen H.M.T., Lynch J.M. eds. Biological control : benefits and risks. Cambridge University Press, Cambridge, 283-290.



LACEY L.A., GOETTEL M.S. 1995 – Current developments in microbial control of insect pests and prospects for the early 21<sup>st</sup> century. Entomophaga, 40 (1), 3-27.

LECLANT F. 1996 – Le monde fascinant des entomophages. Phytoma-Déf. Vég., 487, 26-29.

LEMANCEAU P. 1992 – Effets bénéfiques de rhizobactéries sur les plantes : exemple des *Pseudomonas* spp. fluorescents. Agronomie, 12, 413-437.

LEMANCEAU P., ALABOUVETTE C. 1993 – Suppression of *Fusarium* wilts by fluorescent *Pseudomonads* : mechanisms and applications. Biocontrol Sci. Technol., 3, 219-234.

LISANSKY S. 1997 – Microbial biopesticides. In : Microbial insecticides : novelty or necessity ? Proceedings of a Symposium held at the University of Warwick, Coventry, 16-18 April 1997. British Crop Protection Council, Farnham, (BCPC Symposium Proceedings n° 68), 3-10.

LIU D., KINKEL L.L., ECKWALL E.C., ANDERSON N.A., SCHOTTEL J.L. 1997 – Biological control of plant disease using antagonistic *Streptomyces*. In : Andow D.A., Ragsdale D.W., Nyvall R.F. eds. Ecological interactions and biological control. Westview press, Boulder, 224-239.

MACKAUER M., EHLE L.E., ROLAND J. 1990 – Critical issues in biological control. Intercept, Andover, 330 p.

MAISONNEUVE J.C. 1994 – La lutte biologique sous serre en France. Bull. techn. Inf. Minist. Agric., 17/19, 145-151.

MAISONNEUVE J.C., TREGUIER A. 1996 – Protection biologique et intégrée en horticulture ornementale. P.H.M. Rev. hortic. 368, 47-50.

MAISONNEUVE J.C. 1998 – La protection biologique et intégrée en France en 1997 : reprise et diversification. In : Colloque transnational sur les luttes biologiques, Lille, 21-23 janvier 1998.

MENN J.J. 1996 – Biopesticides : has their time come ? J. Environ. Sci. Health. B 31(3), 383-389.

MINKS A.K., BLOMMERS L.H.M., RAMAKERS P.M.J., THEUNISSEN J. 1998 – Fifty years of biological and integrated control in Western Europe : accomplishments and future prospects. Meded. Fac. Landbouw. Toeg. Biol. Wetensch. Univ. Gent, 63(2a), 165-181

MORAN V.C., HOFFMANN J.H. Eds. 1996 – Proceedings of the IXth international Symposium on biological control of weedsn 19-26 January 1996, Stellenbosch, South Africa, University of Cape Town, 563 p.

- MOSCARDI F. 1999 – Assessment of the application of baculoviruses for control of Lepidoptera. Annu. Rev. Entomol. 44, 257-289.
- MULLER-SCHARER H., SCHEEPENS P.C. 1997 – Biological control of weeds in crops : a coordinated European research programme (COST-816). Integrated Pest Manage. Rev. 2, 45-50.
- NEWTON P.J., NEALE M.C., ARSLAN-BIR M., BRANDL M., FIDGETT M.J., GREATREX R.M. 1996 – Full-range pest management with IPM systems – An industry view of the options for non-indigenous biopesticides. In : Biological control introductions : opportunities for improved crop production. Proceedings of a Symposium held at the Brighton Metropole Hotel, 18 November 1996, (BCPC Proceedings n° 67), 79-97.
- QUIMBY P.C., BIRDSALL J.L. 1995 – Fungal agents for biological control of weeds : classical and augmentative approaches. In : Reuveni R. ed. Novel approaches to integrated pest management. Lewis Publishers, Boca Raton, 293-308.
- RASPLUS J.Y. 1995 – Diversité des arthropodes auxiliaires. In : ANPP, Journée d'information sur les auxiliaires entomophages, Valence, 15 novembre 1995.
- REBOULET J.-N. 1999. Les auxiliaires entomophages. Reconnaissance, méthodes d'observation, intérêt agronomique. ACTA, Paris, 3<sup>e</sup> édition, 135 p.
- REUVENI R. ed. 1995 – Novel approaches to integrated pest management. Lewis Publishers, Boca Raton, 369 p.
- RIBA G., SILVY C. 1989 – Combattre les ravageurs des cultures, Enjeux et perspectives. INRA, Paris, 230 p.
- RIBA G., SILVY C. 1993 – La lutte biologique et les biopesticides. PHYTOMA-Déf. Vég., 452, 21-32.
- RODGERS P.B. 1993 – Potential of biopesticides in agriculture. Pestic. Sci. 39, 117-129.
- SANCHIS V., CHAUFaux J., LERECLUS D. 1995 – Utilisation de *Bacillus thuringiensis* en protection des cultures et résistance des insectes. Cah. Agric. 4 (6), 405-416.
- SANCHIS V., CHAUFaux J., LERECLUS D. 1996 – Amélioration biotechnologique de *Bacillus thuringiensis* : les enjeux et les risques. Ann. Inst. Pasteur / Actualités, 7 (4), 271-284.
- SILVY C. 1995 – Quantifions le phytosanitaire. Courrier Environnement INRA, 25, 80-91.
- SIMBERLOFF D., STILING P. 1996 – How risky is biological control ? Ecology, 77 (7), 1965-1974.



SMITH S.M. 1996 – Biological control with *Trichogramma* : advances, successes and potential of their use. Annu. Rev. Entomol. 41, 375-406.

SMITS P.H. 1997 – Insect pathogens : their suitability as biopesticides. In : Microbial insecticides : novelty or necessity ? Proceedings of a Symposium held at the University of Warwick, Coventry, 16-18 April 1997. British Crop Protection Council, Farnham (BCPC Symposium Proceedings n° 68), 21-28.

STOCKEL J., SCHMITZ V., LECHARPENTIER P., ROEHRICH R., TORRES VILA M., NEUMANN U. 1994 – La confusion sexuelle chez l'eudémis *Lobesia botrana* (Lepidoptera, Tortricidae). Bilan de cinq années d'expérimentation dans un vignoble bordelais. Agronomie, 2, 71-82.

STOCKEL J. 1994 – La confusion sexuelle contre l'Eudémis : bientôt une nouvelle méthode de lutte. U.G.V.B., février, 9-12.

SURINDER K., MUKERJI K.G. 1999. Bacteria as biocontrol agents of insects. In : Biotechnological approaches in biocontrol of plant pathogens. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, USA, 99-114.

TEBEEST D.O. 1996 – Biological control of weeds with plant pathogens and microbial pesticides. Adv. Agron. 56, 115-137.

THEISSEN G., FERRIERE J. 1996 – Importation d'agents de lutte biologique en France. Pas de mesures réglementaires spécifiques... mais une réglementation précise ! PHYTOMA-Déf. Vég., 480, 51-53.

TORMALA T. 1995 – Economics of biocontrol agents : an industrial view. In : Hokkanen H.M.T., Lynch J.M. eds. Biological control : benefits and risks. Cambridge University Press, Cambridge, 277-282.

TROTTIN-CAUDAL Y., MILLOT P. 1996 – Auxiliaires entomophages en cultures protégées, efficacité et qualité. Infos-CTIFL, 118, 44-47.

UTKHEDE R.S. 1996 – Potential and problems of developing bacterial biocontrol agents. Can. J. Plant Pathol. 18, 455-462.

VAN LENTEREN J.C., ROSKAM M.M., TIMMER R. 1997 – Commercial mass production and pricing of organisms for biological control of pests in Europe. Biol. Control, 10, 143-149.

WAAGE J.K. ed. 1996 – Biological control introductions : opportunities for improved crop production. Proceedings of a Symposium held at the Brighton Metropole Hotel, 18 November 1996, (BCPC Symposium Proceedings n° 67), 144 p.

WAAGE J.K. 1997 – Biopesticides at the crossroads : IPM products or chemical clones ? In : Microbial insecticides : novelty or necessity ? Proceedings of a Symposium held at the University of Warwick, Coventry, 16-18 April 1997. British Crop Protection Council, Farnham, (BCPC Symposium Proceedings n° 68), 11-19.

WAJNBERG E., HASSAN S.A. Eds. 1994 – Biological control with parasitoids. CAB International, Oxon, 286 p.

ZECHENDORF B. 1995 – Biopesticides as integrated pest management strategy in agri-culture. In : REUVENI R. ed. Novel approaches to integrated pest management. Lewis Publishers, Boca Raton, 231-259.

ZIMMERMANN G. 1997 – Entomopathogene Pilze : Probleme der Kommerzialisierung und Anwendung. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. 49, 7, 161-165.

ZIMMERMANN G. 1998 – Sustainability in agriculture and forestry : a challenge for the use of entomopathogenic fungi. Bull. OILB/SROP 21(4), 31-34.

Un certain nombre d'autres informations ont également été tirées des bulletins suivants : IBMA News (International Biocontrol Manufacturers Association), Bulletin des Biotechnologies de l'INRA, IPMnet News ainsi que de la revue AGROW (World Crop Protection News).

Sites web : <http://www.barc.usda.gov/psi/bpdl/bdplprod/bioprod.html>  
<http://www.sipweb.org/>